

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

**Měření kvalitativních parametrů na  
metalicko optické síti**

**QoS measurement in metallic-optical  
network**

# Zadání bakalářské práce

Student:

**Lukáš Grunert**

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Měření kvalitativních parametrů na metalicko optické síti.  
QoS measurement in metallic-optical network.

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je popsat základní vlastnosti opticko metalických telekomunikačních sítí a jejich využití v praxi. Součástí práce bude praktická realizace v podobě laboratorních měření vybraných kvalitativních parametrů klíčových úseků hybridní sítě. Výstup práce nabídne analytické zhodnocení naměřených dat pro jednotlivé varianty na sestavené komunikaci.

Osnova:

1. Popište základní přenosové vlastnosti pro metalické a optické sítě a jejich vliv na kvalitu služby.
2. Srovnajte možnosti a využití hybridních opticko-metalických sítí.
3. Realizujte praktická měření vybraných parametrů na xDSL lince.
4. Zpracujte podrobnou analýzu a navrhnete laboratorní měření pro výuku.

Seznam doporučené odborné literatury:

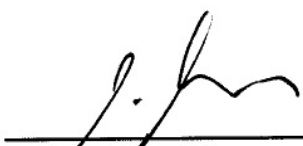
- [1] FILKA, Miroslav. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Brno: M. Filka, 2009. ISBN 978-80-86785-14-1.  
[2] VODRÁŽKA, Jiří. Přenosové systémy v přístupové síti. Vyd. 2., přeprac. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03386-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

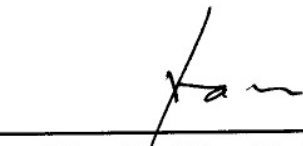
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Přemysl Mer, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019

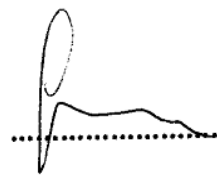
  
prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

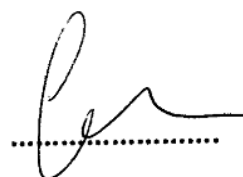
Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 30. dubna 2019

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized capital 'P' followed by a horizontal line that ends in a small wave.

Souhlasím se zveřejněním této bakalářské práce dle požadavků čl. 26, odst. 9  
Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských programech  
VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě 30. dubna 2019

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'P' followed by a horizontal line and a small flourish.

Rád bych na tomto místě poděkoval svému vedoucímu Ing. Přemyslu Merovi, Ph.D. za vedení při vypracování této bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Telekomunikační poskytovatelé jsou nuceni držet krok s trendem zvyšování přenosové rychlosti a poskytování moderních služeb. Ačkoli se stalo optické vlákno velice perspektivní, nahradilo metalické kabely v páteřní části sítě a pomalu se dostává do sítí přístupových, metalická média mají stále své zastoupení. Teoretická část této práce popisuje základní přenosové vlastnosti metalických a optických médií a popisuje základní možnosti hybridních, opticko metalických sítí. Praktická část obsahuje měření vybraných parametrů optické sítě a měření digitálních účastnických širokopásmových přípojek. Práce je zakončena návrhem laboratorního měření, které lze použít pro výuku.

**Klíčová slova:** optická média, metalická média, přenosové parametry, hybridní sítě, ADSL2+, VDSL2

## **Abstract**

Telecommunication providers are forced to keep pace with trend of increasing transmission speed and provision of modern services. Although optical fiber has become very promising, replaced the backbone of the metallic cables and slowly enters the access networks, metallic media are still represented. The theoretical part of this thesis describes the basic transfer properties of metallic and optical media and describes the basic possibilities of hybrid optical metallic networks. The practical part contains measurement of selected parameters of optical network and measurement of digital subscriber lines. The thesis is completed with a design of laboratory measurement that can be used for practical lessons.

**Key Words:** optical media, metallic media, transmission parameters, hybrid networks, ADSL2+, VDSL2

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	<b>9</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>11</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>12</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>13</b>
<b>2 Metalická média</b>	<b>14</b>
2.1 Primární parametry vedení . . . . .	15
2.2 Sekundární parametry vedení . . . . .	16
2.3 Impedanční zakončení vedení . . . . .	17
2.4 Útlum vedení . . . . .	18
2.5 Rušení . . . . .	18
2.5.1 Přeslechy v kabelech se symetrickými páry . . . . .	19
2.5.2 Vnější rušení . . . . .	20
2.6 Odstup signálu od šumu . . . . .	20
2.7 Metalická vedení pro širokopásmové datové systémy . . . . .	21
2.7.1 Symetrická kabelová vedení . . . . .	21
2.7.2 Koaxiální kabelová vedení . . . . .	22
2.8 Digitální účastnické přípojky . . . . .	22
2.8.1 Přípojka ADSL . . . . .	23
2.8.2 Přípojka VDSL . . . . .	26
<b>3 Optovláknová média</b>	<b>29</b>
3.1 Útlum vlákna . . . . .	30
3.2 Útlum odrazu . . . . .	33
3.3 Šířka pásma . . . . .	33
3.4 Numerická apertura . . . . .	34
3.5 Obsah vodních par . . . . .	34
3.6 Minimální poloměr ohybu . . . . .	34
3.7 Disperze . . . . .	35
3.7.1 Vidová disperze . . . . .	35
3.7.2 Chromatická disperze . . . . .	35
3.7.3 Polarizační vidová disperze . . . . .	36
3.8 Parametr MFD . . . . .	36
3.9 Typy vláken . . . . .	36
3.9.1 Jednovidová vlákna . . . . .	36

3.9.2	Mnohovidová vlákna . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Hybridní opticko-metalické sítě</b>	<b>39</b>
4.1	Hybridní síť se symetrickými páry . . . . .	39
4.2	Hybridní síť s koaxiálním kabelem . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Měření metalické části sítě</b>	<b>43</b>
5.1	ADSL2+ . . . . .	43
5.2	VDSL2 . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Měření základních parametrů optické trasy</b>	<b>50</b>
6.1	OTDR . . . . .	50
6.2	Chromatická disperze . . . . .	52
6.3	Polarizační vidová disperze . . . . .	52
<b>7</b>	<b>Návrh laboratorní úlohy</b>	<b>54</b>
7.1	Zadání laboratorní úlohy . . . . .	54
7.2	Teoretický úvod - VDSL2 . . . . .	55
7.3	Schéma zapojení . . . . .	55
7.4	Použité zařízení, místo měření . . . . .	55
7.5	Postup měření . . . . .	56
7.6	Tabulky a grafy . . . . .	56
7.7	Závěr a odpovědi na zadané otázky . . . . .	56
7.8	Zdroje . . . . .	56
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>57</b>
	<b>Literatura</b>	<b>58</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>59</b>
<b>A</b>	<b>Seznam příloh a připojené soubory</b>	<b>60</b>
<b>B</b>	<b>Nastavení DSLAMu</b>	<b>61</b>
<b>C</b>	<b>Tabulky hodnot z měření</b>	<b>65</b>
<b>D</b>	<b>Šablona zadání laboratorní úlohy</b>	<b>68</b>
<b>E</b>	<b>Vzorový protokol z měření laboratorní úlohy</b>	<b>70</b>



## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický význam	Český ekvivalent
ADSL	Asynchronous DSL	Asynchronní DSL
APC	Angled Physical Contact	Zešikmený fyzický kontakt
ATU-C	ADSL Transmission Unit - Central	ADSL modem ústředny
ATU-R	ADSL Transmission Unit - Remote	ADSL účastnický modem
BRI	Basic Rate Interface	Základní ISDN přípojka
CAP	Carrierless Amplitude Modulation	Amplitudová modulace bez nosné
CATV	Cable Television	Kabelová televize
CD	Chromatic Dispersion	Chromatická disperze
CWDM	Coarse WDM	Hrubé WDM
DCF	Dispersion Compensating Fiber	Vlákno kompenzující disperzi
DMT	Discrete Multitone	Diskrétní tónová modulace
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification	Standard pro kabelové rozvody
DSL	Digital Subscriber Line	Digitální účastnická linka
DSLAM	DSL Access Multiplexer	DSL účastnický sdružovač
DWDM	Dense WDM	Husté WDM
EC	Echo Cancellation	Potlačení ozvěn
EPON	Ethernet PON	Ethernet PON
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	Evropský ústav pro telekomunikační normy
FDD	Frequency Division Duplex	Frekvenčně dělený duplex
FEC	Forward Error Correction	Dopředná oprava chyb
FEXT	Far End Crosstalk	Přeslech na vzdáleném konci
FTTx	Fiber To The x	Zavedení vlákna do bodu x
HCPS	Hard-clad Silica Fiber	Vlákno s tvrdým pláštěm
HFC-C	Hybrid Fiber Cable - Coaxial	Hybridní síť s koaxiálním kabelem
HFC-S	Hybrid Fiber Cable - Symmetrical	Hybridní síť se symetrickými páry
IEC	International Electrotechnical Commission	Mezinárodní elektrotechnická komise
ISDN	Integrated Services Digital Network	Digitální síť integrovaných služeb
ISO	International Organization for Standardization	Mezinárodní organizace pro normalizaci
ITU	International Telecommunication Union	Mezinárodní telekomunikační unie

LAN	Local Area Network	Lokální síť
LWP	Low Water Peak	Nízký obsah vodních par
MFD	Mode Field Diameter	Průměr vidového pole
NEXT	Near End Crosstalk	Přeslech na blízkém konci
NIR	Near Infrared spectrum	Spektrum blízké infračervené oblasti
OLT	Optical Line Termination	Optické linkové zakončení
ONU	Optical Network Unit	Optická síťová jednotka
ORL	Optical Return Loss	Útlum odrazu světelného paprsku
OTDR	Optical Time-domain Reflectometer	Reflektometrická analýza vlákna
PC	Physical Contact	Kolmý fyzický kontakt
PoE	Power over Ethernet	Vzdálené napájení ze sítě Ethernet
PMD	Polarization Mode Dispersion	Polarizační vidová disperze
POF	Plastic Optical Fiber	Plastové optické vlákno
PON	Passive Optical Network	Pasivní optická síť
POTS	Plain Old Telephone System	Stará telefonní síť
PSTN	Public Switched Telephone Network	Veřejná telefonní síť
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Kvadrurní amplitudová modulace
RFI	Radio Frequency Interference	Interference rádiovými vlnami
SNR	Signal to Noise Ration	Odstup signálu od šumu
SRA	Seamless Rate Adaption	Adaptivní změna přenosové rychlosti
STM	Synchronous Transport Module	Synchronní transportní modul
STP	Shielded Twisted Pair	Stíněné kroucený pár
TC	Trellis Coded modulation	Mřížkově kódovaná modulace
UTP	Unshielded Twisted Pair	Nestíněné kroucený pár
VIS	Visible light	Viditelné světlo
VDSL	Very-high-bit-rate DSL	Vysokorychlostní DSL
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Vlnový multiplex

## Seznam obrázků

1	Náhradní schéma elementu homogenního vedení . . . . .	15
2	Přeslechy typu NEXT a FEXT mezi páry stejného kabelu . . . . .	19
3	Typické připojení účastníka pomocí technologie ADSL . . . . .	23
4	Rozdělení frekvenčního pásma u přípojek VDSL . . . . .	26
5	Vybrané varianty přípojek VDSL2[28] . . . . .	28
6	Útlumová charakteristika optického vlákna[27] . . . . .	32
7	Základní varianty FTTx využívající technologii xDSL . . . . .	40
8	Obecné schéma HFC-C sítě . . . . .	41
9	Topologie použitá při měření DSL parametrů . . . . .	43
10	Bitové ohodnocení tónů DMT modulace technologie VDSL2 při 0 metrech . . . . .	48
11	Zobrazení 20 km trasy pomocí metody OTDR . . . . .	50
12	Profil max v nastavení DSLAMu . . . . .	61
13	Přiřazení profilu max pro měřený port č.8 . . . . .	61
14	Profil s omezenou rychlostí přenosu v nastavení DSLAMu . . . . .	62
15	Přiřazení profilu BP_GRU0068 pro měřený port č.8 . . . . .	62
16	Channel profil s nastavenou maximální rychlostí 110 Mbit/s . . . . .	63
17	Line profil frekvenčního plánu 30a . . . . .	63
18	Vytvoření šablony GRU0068_30a . . . . .	64
19	Přiřazení šablony k portu . . . . .	64

## Seznam tabulek

1	Primární parametry metalických vedení . . . . .	15
2	Přehledová tabulka variant ADSL . . . . .	25
3	Frekvenční rozložení pásma pro přípojku VDSL . . . . .	26
4	Tabulka DOCSIS specifikací[23] . . . . .	42
5	Nastavení analyzátoru při měření technologie ADSL2+ . . . . .	44
6	Výsledky měření analyzátozem při délce vedení 0 metrů . . . . .	44
7	Tabulka naměřených hodnot VDSL2 přípojky se 30a frekvenčním plánem . . . .	47
8	Tabulka naměřených hodnot metodou OTDR . . . . .	51
9	Chromatická disperze . . . . .	52
10	Polarizační vidová disperze . . . . .	53
11	Polarizační vidová disperze před zprůměrováním . . . . .	65
12	Tabulka naměřených hodnot ADSL2+ přípojky při neomezené rychlosti . . . . .	66
13	Tabulka naměřených hodnot ADSL2+ přípojky při omezené rychlosti . . . . .	67

# 1 Úvod

Trendem dnešní doby je rychlý rozvoj všech odvětví informačních technologií. To si žádá vysoké nároky na přenosové rychlosti, objemy dat, počet a kvalitu nabízených služeb. Sítě, které se ještě před nedávnem považovaly za vrchol doby, jsou dnes nahrazovány modernějšími a vhodnějšími řešeními. Tam, kde kdysi vládla metalická média, jsou dnes nasazena či nasazována média optická. Ne vždy je to však výhodné, a jsou místa, kde metalická média stále přetrvávají.

V první části práce jsou probrána média metalická, jejich stručný vývoj, výskyt v síti, vlastnosti a parametry. Dále jsou uvedeny základní typy metalických vedení a komunikačních systému, které jsou na nich používány. Ve druhé části práce jsou popsány optovláknová média, jejich vlastnosti, výskyt v síti a jejich parametry. Dále jsou uvedeny některé základní typy optických vláken. Třetí část pojednává o problematice hybridních, opticko metalických sítí. Tyto sítě spojují vlastnosti jak metalických, tak optických médií. Ve čtvrté části je zaznamenáno měření digitálních účastnických přípojek, které byly měřeny ve školní laboratoři. Měřeny byly přípojky ADSL2+ (Asymmetric DSL) a VDSL2 (Very-high-bit-rate DSL). Z naměřených hodnot byly vytvořeny přehledné tabulky, grafy a bylo zpracováno zhodnocení. V páté části je zaznamenáno měření parametrů optických tras, které byly vytvořeny ve školní laboratoři pomocí propojení 5km a 10km starších, již vybudových tras. Měření tras proběhlo pomocí reflektometrů metodou OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer), a dále byly změřeny disperze, konkrétně chromatická a polarizační vidová. V poslední části byl vytvořen návrh laboratorní úlohy. Úloha se skládá ze dvou částí, a to připojení se ke školnímu DSLAMu (DSL Access Multiplexer) a nastavení přenosové rychlosti konkrétnímu portu, a dále ověření tohoto nastavení pomocí měření. Úloha je ve formátu .doc a .pdf součástí příloh k bakalářské práci. Součástí úlohy je také malý návod pro práci s DSLAMem.

## 2 Metalická média

Na počátku celé telekomunikační infrastruktury, Internetu, a všeho co dnes známe, byla metalická telefonní a telegrafní síť. S postupem času začal počet uživatelů stoupat, zvyšovaly se nároky na síťové služby (multimédia), a hlavně na přenosové rychlosti a objemy dat. Vznikaly nové standardy, nové metody, a metalická média začala z pole působnosti vytlačovat ta optická. Páteřní sítě už v dnešní době využívají výhradně optiku, nicméně metalická vedení stále nacházejí své uplatnění, a to hlavně v přístupových částech sítě a lokálních datových sítích (LAN - Local Area Network). Po starší generaci veřejné telefonní sítě (PSTN - Public Switched Telephone Network) zůstala rozlehlá síť telefonních symetrických dvojlinek (symetrických párů), které se koncem minulého století (zhruba rok 1990) začaly používat i pro datové a multimediální účely. V počátku pro technologie ISDN (Integrated Services Digital Network), s maximální přenosovou rychlostí 128 kbit/s, později pro technologie DSL (teoretická rychlost až stovky Mbit/s), která přetrvává až do dnes. Mezi další představitele kabelů se symetrickými páry patří STP (Shielded Twisted Pair - stíněný kabel), resp. UTP (Unshielded Twisted Pair - bez stínění), jenž si našel své místo v datových LAN sítích, kde se používá technologie Ethernet (běžný FastEthernet s rychlostí 100 Mbit/s pro délku vedení 100 metrů). Mimo kabely s kroucenými páry zůstaly v zemi i koaxiální kabely, které byly využívány pro systémy kabelové televize CATV (Cable Television). Tyto kabely byly primárně určeny pro analogový přenos televizních kanálů a veřejného rozhlasu. V dnešní době jsou hojně využívány pro systém DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification), což je systém, který vedle klasické analogové televizní distribuce nabízí datové připojení, digitální televizní vysílání, a další služby. Ačkoliv metalických vedení existuje celá řada druhů, v této práci se rozebírá převážně vedení, které používají symetrické, kroucené páry, a koaxiální kabely. Jako symetrické vedení je považováno takové vedení, které má dvojici či dvojice vodičů, které jsou vzájemně stočené. Oba vodiče páru mají téměř shodnou impedanci vůči zemi, jsou tedy symetrické vzhledem k zemi. Vedení se symetrickými páry spadají do kategorie sdělovacích vedení, tj. přenášejí informace na delší vzdálenost. Jako materiál se v dnešní době používá převážně měď.[1][11]

Mezi výhody metalických médií lze zařadit zejména:[1][11]

- Již zbudovaná komplexní síť (telefonní a televizní rozvody)
- Možnost napájení koncového zařízení skrz síť (např. PoE - Power over Ethernet)
- Dobré mechanické vlastnosti (vzhledem k optice)
- Větší průřezy vodičů, manuálně přívětivější

K nevýhodám metalických médií patří:[1][11]

- Vnitřní rušení (bílý šum, přeslechy), vnější rušení (impulzní, rádiové)

- Možnost odposlechu (vyzařování do okolí)
- Malé přenosové rychlosti (vzhledem k optice)
- Vysoké náklady na materiál, spotřeba elektrické energie, hmotnost kabelů
- Citlivost na změnu okolní teploty
- Vzájemné ovlivňování vodičů v kabelovém svazku

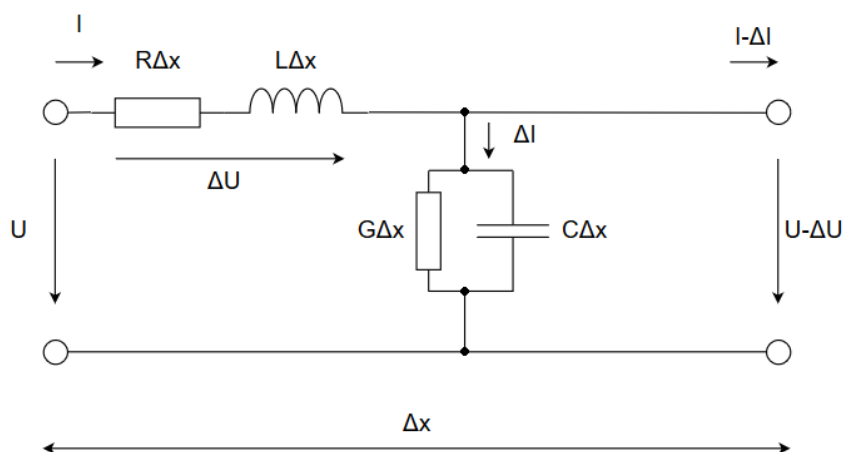
## 2.1 Primární parametry vedení

Základní **elektrické vlastnosti** metalických vedení popisují primární parametry. Zajímáme se o ně při samotné výrobě vedení, resp. kabelů, vodičů. Během provozu nás dále spíše zajímají sekundární parametry, které měříme. **Primární parametry jsou závislé na frekvenci signálu.** Pro danou frekvenci a typ vedení jsou konstantní. Mezi primární parametry patří:

Název	Značení	Typická jednotka
Měrný odpor	R	$\Omega/\text{km}$
Měrná indukčnost	L	$\text{mH}/\text{km}$
Měrná kapacita	C	$\text{nF}/\text{km}$
Měrný svod	G	$\mu\text{S}/\text{km}$

Tabulka 1: Primární parametry metalických vedení

Vhodně uspořádané soustavy metalických vodičů nazýváme telekomunikační vedení. Telekomunikační vedení můžeme zjednodušeně považovat za homogenní vedení, které má ve všech svých částech stejné elektrické vlastnosti. K popisu těchto vlastností nám slouží již zmíněné primární parametry. Celé vedení lze rozdělit do řady nekonečně krátkých elementů vedení délky  $\Delta x$  a ty modelujeme náhradním schématem elementu homogenního vedení dle následujícího obrázku:



Obrázek 1: Náhradní schéma elementu homogenního vedení

Při přenosu signálu vedením vznikají na vedení úbytky napětí a proudu. Úbytek napětí lze spočítat pomocí rovnice:

$$\Delta U = I(R + j\omega L)\Delta x \quad [\text{V}] \quad (1)$$

a úbytek proudu pomocí rovnice:

$$\Delta I = U(G + j\omega C)\Delta x \quad [\text{A}] \quad (2)$$

Pro přenos signálu je žádoucí, aby výkonové úbytky byly co nejmenší, ideálně nulové, a aby vedení nebylo náchylné na okolní rušení vlivem kapacitních a induktivních nerovnovah. [1][11]

## 2.2 Sekundární parametry vedení

Pro popis **přenosových vlastností** metalických vedení uvažujeme sekundární parametry. Přepočítávají se z primárních parametrů. Tyto parametry nás zajímají během provozu vedení, kdy je také měříme. Mezi sekundární parametry patří charakteristická (vlnová) impedance  $Z_c$  a měrná (vlnová) míra přenosu  $\gamma$ . Oba tyto parametry se vyjadřují jako komplexní číslo. Charakteristická impedance se nejčastěji vyjadřuje v exponencionálním tvaru komplexního čísla a měrná míra přenosu v běžném tvaru komplexního čísla s reálnou a imaginární složkou.

### Charakteristická impedance

Udává poměr napětí  $U$  a proudu  $I$  v každém bodě homogenního vedení a vypočítá se pomocí rovnice:

$$Z_c = \frac{U}{I} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = |Z_c| \cdot e^{j\varphi_c} \quad [\Omega] \quad (3)$$

kde  $|Z_c|$  je absolutní hodnota charakteristické impedance (modul vlnové impedance), který udává poměr amplitudy napěťové a proudové vlny v každém místě homogenního vedení a  $\varphi_c$  je argument vlnové impedance, který udává rozdíl mezi fázemi napěťové a proudové vlny v každém místě homogenního vedení. **Je žádoucí, aby  $Z_c$  souhlasilo s impedančním zakončením vedení.**[1][2]

### Měrná míra přenosu

Vyjadřuje relativní změnu napětí a proudu v každém elementu vedení vztáženou na jednotkovou délku vedení. Je konstatní. Vypočítá se pomocí rovnice:

$$\gamma = \frac{\Delta U}{U\Delta x} = \frac{\Delta I}{I\Delta x} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad [\text{km}^{-1}] \quad (4)$$

kde **reálná část  $\alpha$  je měrný (vlnový) útlum** (udávaný v Np/km) a **imaginární část  $\beta$  je měrný fázový posuv** (udávaný v rad/s). V tomto vztahu se  $\alpha$  udává v Np/km, kdežto v praxi



se používá častěji jednotka dB/km ( $1 \text{ Np} = 8,686 \text{ dB}$ ). Měrný fázový posuv  $\beta$  udává zpoždění fáze šířící se vlny na jednotku km. Zpoždění fáze o  $360^\circ$  ( $2\pi$ ) nastane ve vzdálenosti jedné délky vlny  $\lambda$ . Měrný fázový posuv se také někdy označuje jako konstanta vlnové délky. Její hodnota je závislá na parametrech vedení. Závislost mezi vlnovou délkou a měrným fázovým posuvem je znázorněn níže:

$$\beta\lambda = 2\pi \quad \longrightarrow \quad \lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad [\text{km}] \quad (5)$$

Rychlost, jakou se bude šířit fáze elektromagnetické vlny ve vodiči, je dána **fázovou rychlostí šíření**  $v_f$  a vypočítá se pomocí rovnice:

$$v_f = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f = \frac{2\pi f}{\beta} = \frac{\omega}{\beta} \quad [\text{km/s}] \quad (6)$$

Fázová rychlost  $v_f$  je vždy nižší než rychlost šíření elektromagnetické vlny ve volném prostoru.[1][2]

## 2.3 Impedanční zakončení vedení

Amplituda napětí a proudu se v každém místě vedení skládá ze dvou složek:

- Hlavní (postupná) vlna šířící se směrem od počátku ke konci vedení
- Zpětná (odražená) vlna šířící se směrem od konce na začátek vedení

Amplitudy těchto vln závisejí na charakteristické impedanci vedení  $Z_c$  a na impedančním zakončení vedení impedancí  $Z_2$ . **Pokud je vedení zakončeno korektně, tedy  $Z_c = Z_2$ , odražená vlna nevzniká, a veškerý výkon se na konci vedení předá do zátěže.** Tento stav je žádoucí.

Pokud vedení není korektně zakončeno, tj.  $Z_c \neq Z_2$ , můžeme očekávat tyto nežádoucí stavy:

- Vznik odražené vlny a její vektorový součet s vlnou postupnou
- Vznik lokálních minim a maxim amplitudy, vznik stojatých vln
- Vyzařování části energie signálu z vedení ven (chování podobné vyzařovací anténě)
- Náchylnost k příjmu rušivých (cizích) elektromagnetických signálů ze svého okolí (chování podobné přijímací anténě)

Pro výpočet korektnosti impedančního zakončení používáme koeficient odrazu  $r$ :

$$r = \left| \frac{Z_2 - Z_c}{Z_2 + Z_c} \right| \quad [-] \quad (7)$$

nebo útlum odrazu  $A_r$ :

$$A_r = 20 \cdot \log \frac{1}{r} = 20 \cdot \log \left| \frac{Z_2 + Z_c}{Z_2 - Z_c} \right| \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

Koeficient odrazu  $r$  se pohybuje od 0 do 1 a útlum odrazu  $A_r$  od 0 do nekonečna. Pokud bude vedení korektně zakončeno ( $Z_c = Z_2$ ), bude koeficient  $r$  nulový a útlum odrazu  $A_r$  bude nekonečný, což je žádoucí stav. V případě totálního odrazu energie na konci vedení bude  $r = 1$  a  $A_r = 0$ , což je stav nežádoucí.[1][11]

## 2.4 Útlum vedení

Útlum vedení je nejdůležitější parametr ovlivňující přenos signálu. Údává nám, kolik energie signálu se ztratí při průchodu přenosovým médiem. Důsledkem útlumu vedení je omezený dosah komunikačních systémů. Z důvodu útlumu (a rušení/zkreslení) bývají na trasy umísťovány zesilovací a korekční prvky. **Je žádoucí, aby byl útlum vedení co nejmenší.** Útlum metalického vedení se spočítá pomocí rovnice:

$$A = \alpha \cdot l \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

kde  $\alpha$  je měrný (vlnový) útlum (zjistitelný podle 4) a  $l$  je délka vedení.

Jiný způsob jak zjistit útlum vedení je změření výkonu na vstupu (P1) a výstupu (P2) vedení a následný výpočet pomocí rovnice:

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} = L_{m1} - L_{m2} \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

kde  $P_1$  je elektrický výkon na vstupu vedení,  $P_2$  je elektrický výkon na výstupu vedení,  $L_{m1}$  je absolutní úroveň elektrického výkonu na vstupu vztaženého k referenční hodnotě 1 mW a  $L_{m2}$  je absolutní úroveň elektrického výkonu na výstupu vztaženého k referenční hodnotě 1 mW.

**Se zvyšujícím se kmitočtem signálu útlum vedení roste.** Dnešní technologie umožňují používat signály s frekvencí až stovek MHz (např. 100 MHz pro kabel kategorie Cat5 nebo 1 GHz pásmo pro koaxiální kabel) za cenu krácení délky vedení (dosah do 100 metrů pro FastEthernet).[2][11]

## 2.5 Rušení

U metalických médií rozlišujeme dva druhy rušení:

- Vnitřní (interní) rušení - vznik uvnitř kabelu
- Vnější (externí) rušení - průnik rušících vlivů z vnějšího prostředí kabelu

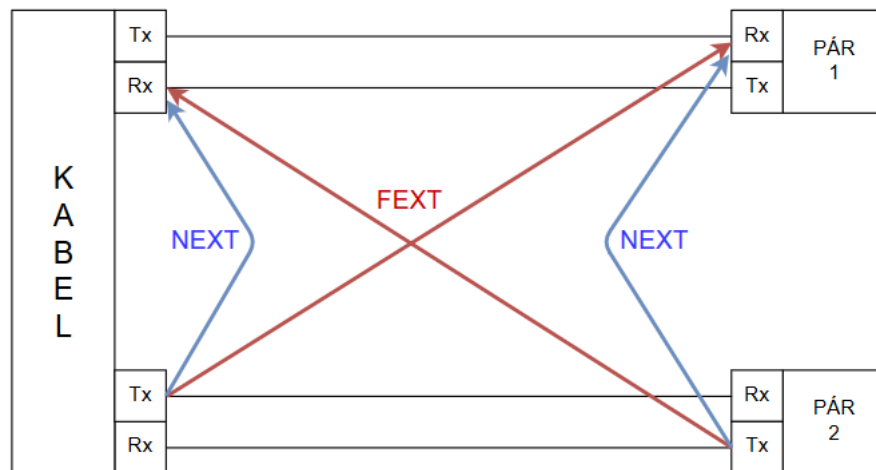
Obecně je vnitřní rušení způsobeno tím, že v rámci jednoho kabelového svazku ovlivňuje každý vodič okolní vodiče. Naopak vnější rušení vzniká průchodem elektromagnetického pole cizích objektů do kabelu. Nejčastějším zdrojem těchto rušení jsou přechodové jevy elektrospotřebičů, a obecně vysokovýkonové elektronické zařízení.[1][2][11]

### 2.5.1 Přeslechy v kabelech se symetrickými páry

Pokud má kabel více symetrických metalických párů, jejich elektrická energie se dostává z jednoho páru na druhý za vzniku interního rušení, nazýváno přeslechem. Takovým způsobem ovlivňuje každý vodič všechny ostatní vodiče v daném kabelu. Podle toho, z jakého místa kam se energie předává, rozlišujeme dva druhy přeslechů:

- NEXT (Near End CrossTalk) - přeslech na blízkém konci
- FEXT (Far End CrossTalk) - přeslech na vzdáleném konci

Následující obrázek vizualizuje příklad obou přeslechů. Pár 1 se v tomto případě chová jako rušící pár a Pár 2 jako pár rušený:



Obrázek 2: Přeslechy typu NEXT a FEXT mezi páry stejného kabelu

Přeslech NEXT vzniká přenosem energie vysílače (Tx) páru 1 do vstupu přijímače (Rx) páru 2 na stejném konci. Přeslech FEXT vzniká přenosem energie vysílače páru 1 do vstupu přijímače páru 2 na opačném konci. Každý pár je rušen všemi ostatními páry různou měrou. Oba přeslechy se dají vyjádřit pomocí **útlumu přeslechu**, nebo **odstupem signálu od přeslechu**.

#### Útlum přeslechu na blízkém konci

$$A_{NEXT} = 10 \cdot \log \frac{P_{1N}}{P_{2N}} \quad [\text{dB}] \quad (11)$$

kde  $P_{1N}$  je vstupní výkon na rušícím páru a  $P_{2N}$  je výstupní výkon na rušeném páru

Generátor i přijímač signálu jsou při měření  $A_{NEXT}$  připojeny na stejné straně měřeného kabelu. Útlum přeslechu je závislý na frekvenci a vzájemné poloze párů v kabelu. S rostoucí vzdáleností jednotlivých párů od sebe klesá  $P_{2N}$  a roste  $A_{NEXT}$ . [2]

### Útlum přeslechu na vzdáleném konci

$$A_{FEXT} = 10 \cdot \log \frac{P_{1N}}{P_{2F}} \quad [\text{dB}] \quad (12)$$

kde  $P_{1N}$  je vstupní výkon na rušícím páru a  $P_{2F}$  je výstupní výkon na rušeném páru na vzdáleném konci

Generátor a přijímač signálu jsou při měření  $A_{FEXT}$  připojeny na opačných stranách měřeného kabelu. Útlum přeslechu na vzdáleném konci je závislý na kmitočtu a zvětšuje se s narůstajícím útlumem vedení. Je také závislý na délce vedení. [2]

### 2.5.2 Vnější rušení

Vnější (externí) rušení značí, že se dostane část energie cizího, vnějšího elektrického pole do vnitřku kabelu. Proti tomuto rušení jsou **ideální** symetrické páry odolné, nicméně ty **reálné** obsahují zemní nerovnováhy (elektrické nerovnováhy vůči zemnímu elektrickému potenciálu), které způsobují průnik těchto rušení do přijímačů signálu vedení. Tyto rušení lze redukovat použitím stínění kabelu. Vysokofrekvenční rušení RFI (Radio-frequency Interference) ovlivňuje médium v celém kmitočtovém pásmu, a to s různou intenzitou rušení. Příčinou jsou rádiové vysílače a amatérské vysílací stanice. Toto rušení ovlivňuje zejména venkovní kabely. Dále existuje impulsní rušení, které je způsobeno přechodovým jevem uvnitř elektrických zařízení, zejména domácích spotřebičů. [2]

## 2.6 Odstup signálu od šumu

Odstup signálu od šumu SNR (Signal to Noise Ratio) vyjadřuje poměr mezi užitečným signálem a nežádoucím šumem na vstupu přijímače. Frekvenčně závislý model výpočtu SNR lze vyjádřit pomocí výkonových spektrálních hustot signálu  $PSD_S$  a šumu  $PSD_N$ :

$$SNR(f) = \frac{PSD_S(f)}{PSD_N(f)} \quad [-] \quad (13)$$

SNR lze také vyjádřit jako poměr výkonů signálu  $P_S$  a šumu  $P_N$ :

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} = 10 \cdot \log \frac{P_S}{P_N} \quad [\text{dB}] \quad (14)$$

Rušení způsobující šum je dvojího druhu - interní a externí. V dnešní době je interní rušení považováno za velmi malé, obecně se počítá s hodnotou -140 dBm/Hz AWGN (Additive White Gaussian Noise). **Externí rušení, zvláště tedy přeslechy NEXT/FEXT a impulsní/-vysokofrekvenční rušení, je naopak limitujícím prvkem při nasazování digitálních přípojek.**[2]

Dle hodnoty SNR se dále uvažuje nad použitými parametry digitálního přenosu, zejména frekvenčním pásmem, modulací, a systémem citlivým na chyby přenosu. **Je žádoucí, aby byla hodnota SNR co nejvyšší.**[2]

## 2.7 Metalická vedení pro širokopásmové datové systémy

Telekomunikační vedení je v nejzákladnějším pojetí tvořeno dvojicí metalických vodičů ve dvou základních uspořádáních:

- Symetrické vedení (symetrický pár) - může být dvojice spirálově stočených vodičů v kabelu nebo dvojice paralelních vodičů zavěšených na izolátorech
- Koaxiální vedení (koaxiální pár) - dvojice souosých vodičů

V této práci jsou popsána pouze kabelová vedení, tzn. vedení uložená v zemi. Více informací lze nalézt v normě ISO/IEC 11801 (International Organization of Standardization/International Electrotechnical Commission), která pojednává o strukturované kabeláži.[1]

### 2.7.1 Symetrická kabelová vedení

Vodiče symetrického páru mají vůči zemi téměř shodné impedance, jsou tedy vůči zemi symetrické. Izolovaný vodič tvoří žílu a stočením několika žil se vytvoří kabelový prvek symetrického kabelu. Nejčastěji se takto stáčí 2 a 4 žíly. Z historického hlediska byly tyto kabely využívány pro signální, místní telefonní a dálkové telefonní účely. Pro vnější rozvody lze jako příklad uvést kabel typu TCEKPFLE (T - sdělovací kabel místní, C - měděné jádro, E - polyetylenová izolace žil, K - kabel, P - duše vyplněná hmotou, FL - stínění součástí pláště, E - polyetylenový plášť)[4], pro vnitřní rozvody kabel typu SYKFY (S - instalační kabel, Y - PVC izolace žil, K - kabel, F - stínící obal na duši kabelu, Y - PVC plášť)[5]. Nejběžnějším průměrem vodičů u nás jsou 4, 6 a 8 mm. V dnešní době se snažíme na vybudovaných sítích tvořených symetrickými páry nasazovat přístupové systémy s technologií xDSL, které pracují řádově v jednotkách až desítkách MHz (novější standardy i ve stovkách MHz). Dále jsou pro počítačové lokální sítě (LAN) využívány metalické kabely (UTP/STP), které tvoří 4 páry stočených žil. Jejich zastoupení v domácích a podnikových sítích je dominantní. Aby tyto kabely mohly být použity pro datovou komunikaci pomocí standardu FastEthernet, musí být schopny zvládnout pracovat v pásmu 100 MHz (UTP Cat5). UTP kabely, které pracují s frekvencí do 100 MHz mají obecně  $100 \pm 15 \Omega$ . [1][2][11]

Při vysokých kmitočtech (řádově  $10^6$  Hz a víc), při nichž platí  $\omega L \gg R$  a  $\omega C \gg G$ , se vedení chová jako **bezeztrátové vedení**. Pro sekundární parametry platí:

$$\gamma = j\beta = j\omega\sqrt{LC} \quad [\text{rad/km}] \quad (15)$$

$$Z_C = j\beta = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\Omega] \quad (16)$$

Měrný odpor  $R$  a měrný svod  $G$  se neuvažují a z komplexního čísla uvažujeme pouze jeho imaginární část.[1][2]

### 2.7.2 Koaxiální kabelová vedení

Koaxiální kabely jsou dvou vodičová nesymetrická vedení se souosými (koaxiálními) vodiči. Vnitřní vodič je tvořen buď plným měděným drátem, nebo měděným lankem. Vnější vodič je tvořen měděným opletem nebo hliníkovou fólií a slouží jako stínění pro vnitřní vodič, musí být zemněn. Mezi vodiči je dielektrická izolační vrstva. Vnější vodič je obklopen pláštěm.[1][11]

- **Tenký koaxiální kabel** s průměrem přibližně 5 mm, útlumem 8 dB/km při 75 MHz a impedancí 50  $\Omega$ , který se využíval v LAN počítačových sítích s rychlostí do 10 Mb/s na vzdálenost přibližně 185 metrů
- **Tlustý koaxiální kabel** s průměrem přibližně 10 mm, impedancí 50  $\Omega$ , s větším stíněním a lepší odolností proti rušení, s dosažitelnou délkou až 500 metrů a využitím v páteřních sítích

Dále se koaxiální kabely využívaly a stále se využívají pro kabelové televizní rozvody CATV. V dnešní době se s nimi můžeme setkat u **hybridních sítí HFC-C - Hybrid Fiber Cable - Coaxial**, která slouží pro distribuci televizních pořadů, datových služeb a doplňových služeb. Zde se využívá to, že již koaxiální rozvody existují z dob distribuce analogové televizní sítě.[1][2][11]

## 2.8 Digitální účastnické přípojky

Digitální účastnické přípojky (DSL) je rodina technologií, která funguje v přístupové části sítě a slouží pro připojení účastníka k širokopásmovým službám, nejčastěji Internetu. Některé standardy vedle širokopásmových datových služeb podporují připojení do ISDN či PSTN sítě. DSL je provozováno na starých, již vybudovaných telefonních sítích (symetrické páry - místní smyčky), na kterých byl kdysi uskutečňován provoz nízkofrekvenčních analogových hovorových služeb (klasická telefonní linka). Technologie DSL se obecně dělí podle toho, jestli pracuje v základním pásmu (HDSL - High-bit-rate DSL, SDSL - Symmetric DSL) nebo přeloženém pásmu (ADSL, VDSL), a dále podle symetrie přenosových rychlostí pro vzestupný (UPSTREAM) a sestupný

(DOWNSTREAM) směr přenosu. V dnešní době jsou dominantní standardy ADSL a VDSL.

Jako základní faktory ovlivňující nasazení efektivnějších systémů jsou:

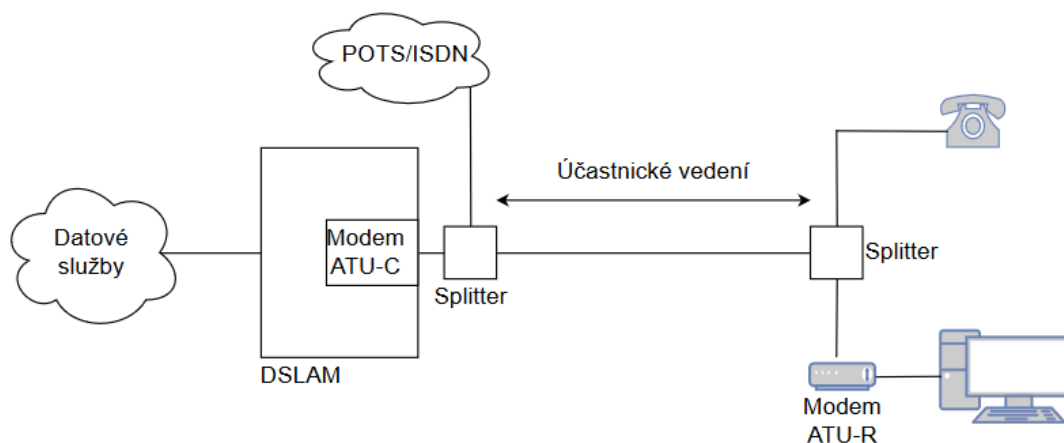
- Vzdálenost mezi účastníkem a ústřednou poskytovatele
- Kvalita kabelu a počet symetrických párů v něm (vznik NEXT a FEXT přeslechů)
- Rušící prvky v okolí kabelu

Práce se zabývá systémy pracujícími v přeloženém pásmu, konkrétně technologií ADSL a technologií VDSL. Informace o xDSL technologiích lze nalézt v ITU-T (International Telecommunication Union - Telecommunication) doporučeních G.990 až G.999, které slouží pro problematiku přístupových sítí.[12]

### 2.8.1 Přípojka ADSL

Technologie ADSL se řadí mezi technologie s asymetrickou přenosovou rychlostí (teoretická rychlost sestupná je 8 Mbit/s a vstoupná 1 Mbit/s) a fungováním v přeloženém pásmu (0 Hz až 1,104 MHz). Používá jeden symetrický pár, na kterém lze současně používat datové služby a telefonní služby, případně základní přípojku ISDN (BRI - Basic Rate Interface). Dosah technologie činí 2-5 km. ADSL používá modulaci typu DMT (Discrete Multitone), kde každý DMT subkanál používá modulaci QAM (Quadrature Amplitude Modulation). ADSL je popsáno v ITU-T doporučení G.992.1.[6]

Na obrázku 3 je znázorněno typické připojení účastníka do datové a telefonní sítě pomocí přípojky ADSL.



Obrázek 3: Typické připojení účastníka pomocí technologie ADSL

## Splitter

Účastnické vedení (symetrický pár vedoucí mezi účastníkem a ústřednou) je z obou stran připojeno do tzv. splitteru. Splitter je zařízení, které obsahuje dvojici frekvenčních filtrů (horní a dolní propust). Tyto filtry od sebe oddělují telefonní (nebo ISDN) signál a datový signál. Na straně poskytovatele (provozovatele) se telefonní pásmo odvádí do pevné telefonní sítě (může a nemusí být součástí služeb týkajících se poskytovatele datových služeb), a datové pásmo do modemu ATU-C (ADSL Transmission Unit-Central) v tzv. DSLAMu (resp. rDSLAMu), který jej přeposílá na přepínač/směrovač a dále do datové sítě (nejběžněji Internet). Na straně účastníka se telefonní pásmo odvádí do telefonního zařízení nebo faxu, a datové pásmo do ADSL modemu ATU-R (ADSL Transmission Unit-Remote), který sdružuje datový provoz z domácí LAN sítě. Z modemu se data přeposílají do počítače nebo digitální TV, nebo dále do LAN sítě (záleží na dimenzování LAN sítě).

## Modem

Při vzestupném směru přenosu (od účastníka do sítě) modem realizuje sestavení příchozích dat do rámce ADSL, během čehož se spočte kontrolní součet CRC (Cyclic Redundancy Check) pro možnou detekci chyb, data jsou skramblována (což je proces, při kterém se vstupní sekvence dat přeháze na výstupní pseudo-náhodnou sekvenci dat z důvodu eliminace dlouhých sekvencí stejných symbolů), a nakonec zabezpečena pomocí dopředné chybové korekce FEC (Forward Error Correction) pro zajištění korekce chyb v přijímači. Jednotlivé bity rámce jsou dále rozděleny do subbloků a přiřazeny na jednotlivé nosné nosné v subkanálech modulace DMT. Pro zlepšení detekce stavů při mnohastavové modulaci se používá mřížkové kódování TC (Trellis Coded modulation). Před a po D/A (Digital/Analog) modulaci se ještě provádí filtrace pro odstranění redukci nechtěných prvků signálu. Při sestupném směru (od sítě k účastníkovi) se první provede metoda potlačení ozvěn EC (Echo Cancellation) a dále se děje inverzní proces k procesu popsanému výše.

## DSLAM, rDSLAM

Účastnický koncentrátor (přístupový multiplexer) DSL (DSLAM) soustřeďuje digitální toky od všech přípojek v dané lokalitě. Obsahuje ADSL modem ATU-C pro každého připojeného účastníka. Jeho funkcí je směrování dat a distribuce služeb. Provádí základní monitorování, správu a údržbu sítě. Podporuje upřednostňování dat citlivých na zpoždění a úpravu provozu. Dle umístění dělíme účastnické koncentrátory na:

- **DSLAM s umístěním u telefonní ústředny** - přípojky jsou k němu odbočeny z hlavního rozvodu ústředny. Podle místa ukončení optického přenosu se někdy označuje FTTex (Fiber To The exchange). Toto uspořádání je typické pro ADSL (v dnešní době ADSL2+).
- **rDSLAM s umístěním mezi telefonní ústřednou a účastníkem v rozvaděči** - Podle místa ukončení optického přenosu se někdy označuje FTTC (Fiber To The Cabinet). Toto



řešení je vhodné pro VDSL poskytované pro lidnatější oblasti a je typickým příkladem hybridní přístupové sítě HFC-S (Hybrid Fiber Cable - Symmetric pairs).

### Rozdělení frekvenčního pásma a použitá modulace

U ADSL je frekvenční pásmo 0 Hz až 1,104 MHz rozděleno na 256 subkanálů (číslovaných 0 až 255) s šířkou 4,3125 kHz. Pro každý subkanál se provádí kvadraturní amplitudová modulace QAM. Na každou nosnou lze přiřadit 2 až 15 bitů, čemuž odpovídá přenosová rychlost až 60 kbit/s na jeden subkanál. Spodní část spektra se využívá pro telefonní či ISDN služby (s označením ADSL over POTS, resp. ADSL over ISDN). Varianty, které využívají část frekvenčního spektra pro ISDN-BRI, začínají s ADSL přenosem až na frekvenci 138 kHz. Pro řešení datových toků pro sestupný a vzestupný směr se používá metoda frekvenčního dělení FDD (Frequency Division Duplex), nebo metoda potlačení ozvěn EC. Následuje přehledová tabulka jednotlivých variant ADSL:

Varianta ADSL	Vzestupný směr			Sestupný směr		
	Počet subkanálů	Frekvenční pásmo [kHz]	Přenosová rychlost [Mbit/s]	Počet subkanálů	Frekvenční pásmo [kHz]	Přenosová rychlost [Mbit/s]
EC/POTS	26 (6-31)	25-138	1,5	250 (6-255)	25-1104	15
FDD/POTS	26 (6-31)	25-138	1,5	224 (32-255)	138-1104	13,4
EC/ISDN	32 (32-63)	138-276	1,86	224 (32-255)	138-1104	13,4
FDD/ISDN	32 (32-63)	138-276	1,86	198 (64-255)	276-1104	11,8

Tabulka 2: Přehledová tabulka variant ADSL

Můžeme si povšimnout, že velikost přenosové rychlosti daného směru závisí na počtu subkanálů, a varianta s metodou EC vykazuje vyšší přenosové rychlosti oproti variantám s metodou FDD (z důvodu překrývání pásem obou přenosových směrů). Varianty EC/POTS a FDD/POTS mají v doporučení ITU-T G.992.1 označení Annex A, varianta EC/ISDN má označení Annex B. Pro variantu FDD/ISDN existuje specifikace ETSI TS 101 388 (European Telecommunications Standards Institute). Je nutno uvést, že při metodě potlačení ozvěn EC se objevují nežádoucí přeslechy NEXT, které můžeme u metody FDD téměř zanedbat. Tato skutečnost může být kritická při nasazení většího počtu přípojek ADSL v jednom kabelu.[6]

### ADSL2+

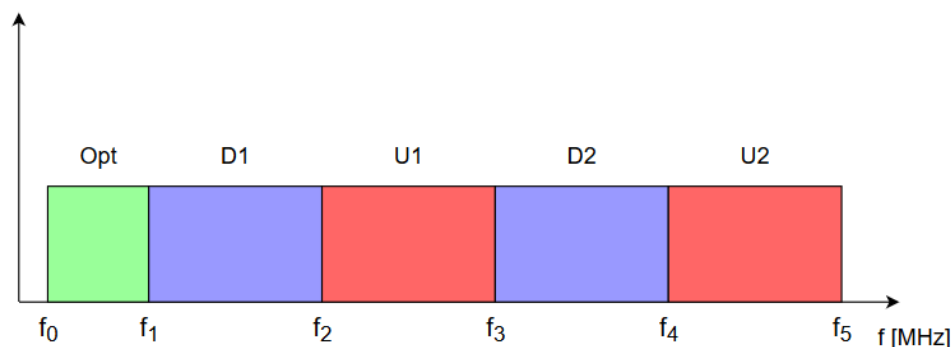
Nejjednodušší způsob, jak zvýšit přenosovou rychlost, je zvětšit přenášené pásmo. Zatímco ADSL má horní frekvenci pásma 1,104 MHz, ADSL2+ tuto hranici zdvojnásobilo na 2,208 MHz. Vzhledem k použití vyšších frekvencí má ADSL2+ menší dosah než ADSL. ADSL2+ je popsáno v doporučení ITU-T G.992.5. Do 1,2 km délky vedení je ADSL2+ schopno poskytnout přenosovou rychlost nad 20 Mbit/s. ADSL2+ s dynamickou správou spektra DSM je schopno nabídnout 17 Mb/s na vzdálenost 2 km, 8 Mbit/s na vzdálenost 3 km a 6 Mbit/s na vzdálenost 3,5 km. ADSL2+ je tedy schopno poskytnout relativně vysoké přenosové rychlosti i tam, kde rychlejší

přípojka VDSL nedosáhne. Přípojky generace ADSL2 a mladší podporují paketový způsob přenosu PTM (Paket Transfer Mode).[6][12]

## 2.8.2 Přípojka VDSL

Digitální účastnická přípojka VDSL má ze všech přípojek rodiny DSL nejvyšší přenosové rychlosti, a to za cenu malého dosahu (do 1,6 km). Přenosové rychlosti se pohybují v řádech desítek Mbit/s v závislosti na rušení, přesleších a délce vedení. Horní hranice frekvenčního pásma se posunula až na 12 MHz. VDSL může být symetrické i asymetrické a uskutečňuje telefonní či ISDN přenos stejně jako ADSL. VDSL se používá v koexistenci s optickými vlákny. VDSL je popsáno v doporučení ITU-T G.993.1. Metoda potlačení ozvěn EC se u VDSL z důvodu velkého NEXT přeslechu nepoužívá, používá se metoda frekvenčního dělení FDD.

Rozdělení pásma pro směr vzestupný a sestupný se ve VDSL řeší pouze pomocí frekvenčního dělení FDD, metoda potlačení ozvěn EC se z důvodu velkého NEXT přeslechu nepoužívá. Rozdělení frekvenčního pásma se řeší ve třech variantách: Annex A, B a C (přičemž C je používáno pouze ve Švédsku).[26]



Obrázek 4: Rozdělení frekvenčního pásma u přípojek VDSL

Varianta	$f_0-f_1$	$f_1-f_2$	$f_2-f_3$	$f_3-f_4$	$f_4-f_5$
Annex A	0.025-0.138	0.138-3.75	3.75-5.2	5.2-8.5	8.5-12
Annex B	0.025-0.138	0.138-3.0	3.0-5.1	5.1-7.05	7.05-12

Tabulka 3: Frekvenční rozložení pásma pro přípojku VDSL

Obrázek 4 ukazuje rozložení frekvenčního pásma na pět úseků - D1 a D2 pro downlink (směr sestupný), U1 a U2 pro uplink (směr vzestupný). Použití pásma Opt (Optimal - optimální) se dojednává při sestavení spojení mezi vysílačem a přijímačem. Tabulka 3 ukazuje, jak jsou nastaveny frekvenční hranice pro jednotlivé směry přenosu. Annex A se také někdy označuje jako Plan 998 a Annex B jako Plan 997.[26]

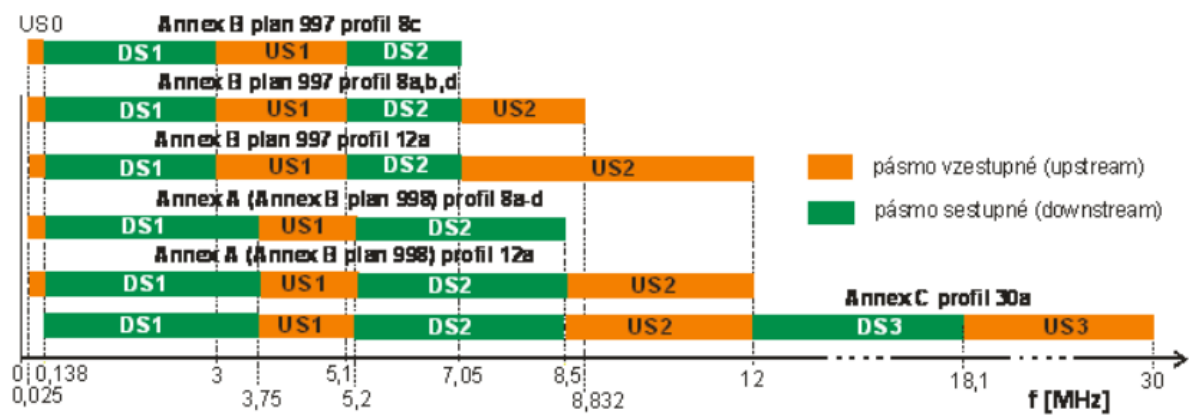
V rámci VDSL existují dvě modulační varianty, které jsou vzájemně nekompatibilní (pro oblast Evropy jsou tyto metody popsány v dokumentu ETSI TS 101 270-2):[2]

- **Modulace s více nosnými (MCM - Multi-Carrier Modulation)** - modulace DMT (tak jak je standardizovaná a používaná u ADSL). S horní hranicí 12 MHz se uvažuje až 4096 subkanálů. Maximální počet bitů na nosnou je v rozmezí 8 až 15.
- **Modulace s jednou nosnou (SCM - Single-Carrier Modulation)** - modulace CAP nebo modulace QAM. Modulace s jednou nosnou je myšleno pro každý přenosový směr vyznačený v přenosovém pásmu. Přiřazuje 2 až 10 bitů na nosnou.

Struktura připojení účastníka je podobná té u ADSL (obrázek zde: 3) s tím rozdílem, že se často využívají předsunuté rDSLAMy, které zkracují délku vedení, což je pro systém VDSL prioritní. Při návrhu, kde rDSLAM postavít, se musí dbát na to, kolik účastníků v dané lokalitě lze připojit a v jakých vzdálenostech.

## VDSL2

Stejně jako ADSL nebo VDSL je VDSL2 navrženo pro použití na již existujících metalických linkách (místní účastnické smyčky). Z důvodu velkého kmitočtového pásma je VDSL2 vhodné pro vysokokapacitní přenosy na menší vzdálenosti, nejvhodněji v rámci budov, firmy, či jako propojení mezi účastníky a předsunutým rDSLAMem. Obecně se VDSL2 považovalo za technologii s frekvenčním pásmem do 30 MHz (maximální teoretická přenosová rychlost 200 Mbit/s), avšak v roce 2015 byla standardizována varianta s frekvenčním pásmem 35 MHz (maximální přenosová rychlost 400 Mbit/s). Stejně jako standardy ADSL2 a mladší používá VDSL2 tzv. SRA (Seamless Rate Adaption), kdy pomocí měření rušivých vlivů v kabelu adaptivně mění přenosovou rychlost. Dále je schopno regulovat svůj vysílací výkon tak, aby zasahoval co nejméně do okolních symetrických párů v kabelu. Aby nemuseli výrobci vytvářet komplexní zařízení a mohli se soustředit na konkrétnější oblast použití, byly vytvořeny tzv. profily. Profilů je devět - 8a, 8b, 8c, 8d, 12a, 12b, 17a, 30a, 35a. Každé VDSL2 zařízení by mělo podporovat alespoň jeden z těchto profilů. Spolu s podporou alespoň jednoho profilu by měla zařízení podporovat alespoň jednu regionální specifikaci (Annex A pro Severní Ameriku, Annex B pro Evropu a Annex C pro Japonsko). Všechny variace VDSL2 a jejich specifikace přenosu jsou popsány v ITU-T doporučení G.993.2. V dnešní době je snaha o zavádění tzv. VDSL2 Vectoringu. Jedná se o přenosovou metodu, která koordinuje elektrické signály datových linek tak, aby snížila vliv přeslechů a zvýšila účinnost přenosu (zejména přenosovou rychlost). Účinnost této metody závisí na charakteru trasy, na kterém je VDSL2 provozováno. Může sloužit jak pro zvýšení účinnosti přenosu jednoho uživatele, tak i skupiny uživatelů.[19][20]



Obrázek 5: Vybrané varianty přípojek VDSL2[28]

### 3 Optovláknová média

Jak vyplývá z vlastností metalických vedení, nejsou vhodná pro přenos vysokými rychlostmi na dlouhé vzdálenosti (vysoký útlum, náchylnost na rušení, rozdíly potenciálu apod.). Obecně lze navyšovat frekvence a s ní i přenosová rychlost, nicméně za cenu krácení vzdálenosti. Proto se hledaly a stále hledají nové způsoby, materiály a technologie, jak na tyto omezení vyzrát. Mezi nejúspěšnější objev patří technologie optického vlákna, tedy skleněné či plastové trubičky, ve které se informace přenáší pomocí světla (narozdíl od metalických vedení, kde se informace přenáší pomocí elektrického napětí a proudu). O celkový rozbor optických vláken se stará Mezinárodní telekomunikační unie **ITU-T v doporučeních G.650 až G.659**. Od začátku vývoje optických vláken (70. léta 20. století), kdy byla běžná realita mít měrný útlum vlákna okolo 20 dB/km, šel vývoj prudce dopředu. Již v roce 1990 byly nasazovány digitální systémy se vzdáleností opakovačů rovnou 50 kilometrů a měrným útlumem vláken okolo 0,5 dB/km.[7] V dnešní době mají optická vlákna měrný útlum v řádech desetin dB/km a nahradila metalická vedení v páteřní části sítě. Pomalu se dostávají i do sítí přístupových v podobě přípojek FTTx, resp. pasivních optických sítí PON.[8]

Mezi **výhody** optických vláknových médií lze zařadit zejména:

- Nízký měrný útlum, možnost komunikace na velmi vysoké vzdálenosti
- Vysoké přenosové rychlosti (velká šířka pásma)
- Nemožnost odposlechu bez narušení vlákna
- Malá hmotnost, malé rozměry
- Možnost nasazení sítě bez aktivních prvků (PON - Passive Optical Network)
- Obecně malý vstupní výkon zdrojů
- Odolnost proti rušení
- Vysoká spolehlivost

A k **nevýhodám** patří:

- Dražší zařízení (vzhledem k metalice)
- Menší mechanická odolnost a manipulace (mikro a makro ohyby)
- Velmi malý průřez jádra, nutnost navazování světla pomocí speciálních praktik

Zejména vzhledem k vysokým přenosovým rychlostem, dalekému dosahu, odolnosti proti rušení a nemožnosti odposlechu lze očekávat, že optická média v budoucnosti nahradí ty metalická ve

všech částech sítě s širokopásmovými a multimediálními službami.

Mezi základní parametry optického vlákna, o které se zajímáme, patří:[9]

- Útlum vlákna (resp. měrný útlum vlákna)
- Šířka pásma
- Numerická apertura NA
- Obsah  $OH^-$
- Minimální poloměr ohybu
- Disperze - chromatická, vidová, polarizační
- Parametr MFD (Mode Field Diameter, u jednovídných vláken)

Dále se zavádí základní veličina **index lomu  $n$** , která popisuje, kolikrát se paprsek světla v daném prostředí pohybuje pomaleji, než je rychlost světla ve vakuu.[1]

$$n = \frac{c}{v} \quad [-] \quad (17)$$

kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu ( $\approx 300\,000$  km/s) a  $v$  je rychlost světla v uvažovaném prostředí.

### Obecné dělení vláken:

Rozlišujeme dva základní druhy optických vláken: **jednovídná - SM** (která přenášejí pouze jeden paprsek světla) a **mnohovídná - MM** (která přenášejí více paprsků světla). MM vlákna dále dělíme na vlákna se skokovou změnou indexu lomu jádra a vlákna s gradientní (postupnou) změnou indexu lomu jádra.

### 3.1 Útlum vlákna

Při začátcích práce s optickými vlákny v 70. letech 20. století měly vlákna útlum v desítkách dB/km. V polovině 80. let se s postupným vývojem dostal útlum na jednotky dB/km, a pro dnešní dobu to již činí desetiny dB/km. [7] Útlum optického vlákna je především způsoben:

- Absorbci energie paprsku ve vlastním materiálu vlákna
- Rozptylem paprsku na nehomogenitách v materiálu vlákna
- Vyzařováním energie ven z vlákna (mikro a makro ohyby)
- Při spojování vláken (svary, konektorová spojení, nečistoty)

### Absorbce:

Materiál, ze kterého se skládá jádro optického vlákna, pohlcuje část světelné energie paprsku. Paprsek se absorbuje jak na vlastním materiálu jádra (molekuly skla, resp. plastu), tak i na cizím materiálu (molekuly nečistot které se do vlákna dostaly během výroby). **Ztráty absorbcí jsou závislé na vlnové délce optického záření.**[9]

### Rozptyl:

Při střetu optického záření paprsku s molekulami jádra vlákna se část záření láme a odráží do všech směrů. Energie záření, která se takhle rozptýlí, se utlumí v plášti vlákna, nebo se vrací zpět ke zdroji záření.[9]

### Mikro a makro ohyby:

Chyby v geometrii vlákna vzniklé výrobou nebo proniknutím vnějších sil můžou mít za následek odklon paprsku mimo směr šíření a jeho následné utlumení. Při ohýbání vlákna se může změnit úhel dopadu a odrazu paprsků světla. Pokud některý z nich překročí hodnotu mezního úhlu odrazu, nevrátí se do jádra a pronikne do pláště stejně jako v případě mikroohybů. Vláknem by se mělo ohýbat s co největším poloměrem a dodržovat zásady výrobce daného vlákna.[9]

### Spojování vláken (svary, konektory)

Útlumu, který vzniká na svarech a konektorech, říkáme **vložný útlum**. Při vytváření delších tras musíme jednotlivá vlákna určité délky svařit k sobě. Ke svařování vláken nám slouží speciální svářečky se systémem mikrokamer, které automaticky měří útlum svaru. Tento útlum by neměl přesáhnout hodnoty 0,2 dB. Na začátku a konci optické trasy se musí vlákno zavést do zařízení pomocí speciálních optických konektorů, které nám do trasy také zavádějí útlum. Neměl by přesáhnout hodnotu 0,5 dB na každý konektor. Před každým konektorovým spojováním vláken by se mělo vlákno očistit. V rámci konektorů se nám také uplatňuje tzv. **Fresnelův odraz**, kde se část výkonu optického záření odráží od čela vlákna a vrací se zpět ke zdroji záření. Stejným způsobem se tento odraz uplatňuje na konci trasy u detektoru záření. Tento stav je nežádoucí, měří se, a říká se mu **útlum odrazu**. Útlum odrazu by měl být vždy co největší (řádově alespoň 40 dB). Dále může být vložný útlum způsoben spojením dvou vláken o různém průměru jader, kdy se na přechodu vlákno-vlákno může paprsek utlumit v plášti druhého vlákna. V případě posunutí os dvou vláken se paprsek může úplně vyvézt mimo vlákno. A v případě úhlové odchylky spojovaných vláken může nastat jak utlumení v plášti, tak vyvázání ven. Mezi poslední chyby ovlivňující útlum patří špatně spojená vlákna (ve smyslu spojení dvou čel vláken např. v konektoru), kdy mezi dvěma vlákny, či vláknem a zařízením, vzniká vzduchová mezera, která má jiný index lomu než jádro vlákna a paprsek se na ní láme a odráží.[7][9]

Obecně lze spočítat **útlum vlákna** obdobně jako v případě metalického vedení, tedy pomocí

vzorce:

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} \quad [\text{dB}] \quad (18)$$

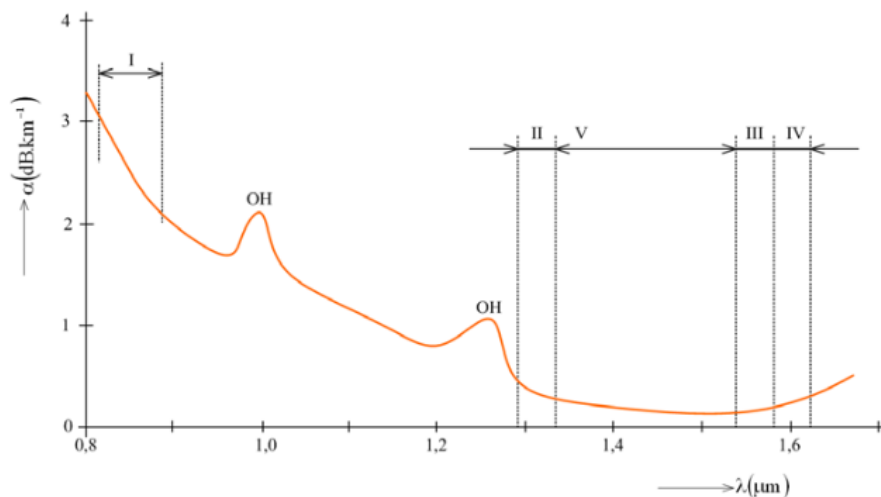
kde  $P_1$  výkon světelného záření na začátku a  $P_2$  na konci měřeného vlákna.

Dále rozlišujeme **měrný útlum vlákna**, což je obecný útlum vlákna vztažený na 1 km délky vlákna:

$$\alpha = \frac{A}{l} = \frac{1}{l} \cdot 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} \quad [\text{dB/km}] \quad (19)$$

kde  $l$  je celková délka měřeného vlákna.

**Útlumová okna:**



Obrázek 6: Útlumová charakteristika optického vlákna[27]

Obrázek 6 zobrazuje útlumovou charakteristiku s vyznačenými tzv. **vlnovými okny** (I až V), které nám udávají, na jakých vlnových délkách záření má vlákno nejlepší útlumové vlastnosti.[7]

- **I. okno** (850 nm) spadá do mnohovidového šíření, je z hlediska vysokého útlumu nevhodné pro dálkové systémy a díky levným zdrojům záření se uplatnilo u přístupových sítí.
- **II. okno** (1280 až 1335 nm) je vhodné pro jednovidové šíření, typická hodnota měrného útlumu je těsně pod 0,35 dB/km, využívá se pro dálkové přenosy.
- **III. okno** (1530 až 1565 nm) se využívá pro dálkové přenosy v páteřních (globálních) sítích, typický měrný útlum se pohybuje v hodnotách 0,19 až 0,22 dB/km.



- **IV. okno** (1565 až 1625 nm) se nachází za útlumovým minimem spektra, nicméně se používá pro doplnění III. okna ve WDM (Wavelength Division Multiplex) systémech a dovoluje zdvojnásobit přenosovou kapacitu.
- **V. okno** (1335 až 1530 nm) je dostupné až od 90. let, kdy byla výroba optických vláken zvládnuta natolik, že se odstranily příměsy OH (vodních par) a ztratilo se lokální maximum útlumu na vlnové délce 1380 nm. Spojením II., III., IV. a V. vzniká souvislý přenosový kanál o šířce pásma 50 THz.

Při výstavbě trasy můžeme útlum ovlivnit především správným výběrem vlákna, kvalitními svary, dodržením stanovených doporučení pro ohyb vlákna od výrobce, kvalitními konektory a správnou pokládkou vlákna.

### 3.2 Útlum odrazu

Matematické vyjádření pro útlum odrazu je vidět zde:

$$ORL = 10 \cdot \log \frac{P_i}{P_r} \quad [\text{dB}] \quad (20)$$

kde  $P_i$  je vstupní výkon a  $P_r$  je výkon odražený.

Při průchodu světelného paprsku optickou trasou se jeho výkon částečně odráží zpět směrem ke zdroji záření. Tento odraz vzniká jak ve vlastním materiálu vlákna, tak na svarech a konektorech. **Nejvyšší podíl na odražení energie paprsku mají konektorová spojení.** Pokud je na trase s citlivým laserovým zdrojem útlum odrazu malý, může odražená energie způsobit rozkalibrování a i úplné odstavení laserového zdroje. Při reflektometrické metodě měření tras OTDR může příliš velký odraz na konektoru nebo vstupu vlákna způsobit tzv. mrtvou zónu, ve které nebudeme moct analyzovat část trasy.

Pro co nejvyšší možný útlum odrazu byly vyvinuty tzv. APC (Angled Physical Contact) konektory. APC konektory mají čelo vlákna zbroušeno pod  $8^\circ$  úhlem a vyznačují se nejvyšším útlumem odrazu (okolo 60 dB). Pro porovnání, PC (Physical Contact) konektory, jenž nejsou zbroušeny pod žádným úhlem, mají útlum odrazu kolem 30 dB, tedy tisíckrát menší než APC konektory.[15][16]

### 3.3 Šířka pásma

Šířka pásma udává nejvyšší kmitočet signálu, který může být spolehlivě přenesen na vzdálenost 1 km, aniž by byl příliš zkreslen vlivem disperzí. Udává se pro MM vlákna. Jednotkou šířky pásma je MHz·km. Je závislá na konstrukčním uspořádání, na materiálu optického vlákna a velký vliv má samotná vlnová délka přenášeného signálu. **Změnou vlnové délky můžeme ovlivňovat šířku pásma.**[9]

### 3.4 Numerická apertura

Numerická apertura nám udává největší úhel, pod kterým se může světelný paprsek navázat do vlákna tak, aby byl vláknem přenesen.

$$NA = \sin v = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad [-] \quad (21)$$

kde  $v$  je maximální úhel limitující přenos paprsku ze začátku vlákna na jeho konec,  $n_1$  je index lomu jádra a  $n_2$  je index lomu pláště.

Podmínkou pro vedení optického záření světlovodem je úplný odraz paprsku na rozhraní jádra a pláště ( $n_1$  a  $n_2$ ). Překročí-li úhel paprsku mezní úhel vlákna, paprsek na rozhraní jádro-plášť láme a dostává se do pláště, což je nežádoucí. NA je nejčastěji odvozena z vyzařovací charakteristiky vlákna. Udává jí výrobce vlákna.[9]

### 3.5 Obsah vodních par

Během výroby vláken se do vlastního materiálu vlákna dostávají molekuly vodních par ( $OH^-$  ionty). Tyto ionty ovlivňují na některých vlnových délkách útlum vlákna. Podle obsahu  $OH^-$  iontů dělíme vlákna na:

- Vlákna s nízkým obsahem  $OH^-$  (označení „low  $OH^-$ “) - jsou určena pro signály v blízké infračervené oblasti (NIR - Near Infrared spectrum) světla.
- Vlákna s vysokým obsahem  $OH^-$  (označení „high  $OH^-$ “) - jsou určeny pro signály v ultrafialové (UV - Ultraviolet) a viditelné (VIS - Visible) oblasti světla.

Současné technologie výroby umožnily velké potlačení výskytu  $OH^-$  iontů ve vláknech a razantnímu snížení útlumu v oblasti 1335 až 1530 nm. Tato vlákna nesou označení LWP (Low Water Peak). Nicméně starší, již delší dobu položené optické vlákna a kabely mohou obsahovat vlákna bez potlačení výskytu  $OH^-$  iontů, s čímž je třeba vždy počítat.[7][9]

### 3.6 Minimální poloměr ohybu

Minimální poloměr ohybu vlákna je nejmenší ohyb, který je možné při instalaci vlákna použít. Je závislý na materiálu a průměru vlákna, popř. kabelu. **Čím je průměr vlákna větší, tím větší je minimální poloměr ohybu.** Vlákna z plastu mají při stejném průměru vlákna menší minimální poloměr ohybu než skleněná. Minimální poloměr ohybu je katalogový údaj udávaný výrobcem vlákna a je nutno ho dodržovat. Při nedodržení pokynů výrobce se může zvýšit útlum vlákna vlivem vyvázání světla mimo jádro, popřípadě může nastat i prasknutí vlákna.[9]

### 3.7 Disperze

Disperze je fyzikální jev, který je hlavní příčinou zkreslení signálu. **Definuje se jako rozdíl šířky impulsu v polovině výšky na konci a na začátku vlákna.**[7] Rozlišujeme tři základní druhy disperzí:

- **Vidová** disperze - pouze MM vlákna
- **Chromatická** disperze - SM i MM vlákna
- **Polarizační vidová** disperze - pouze SM vlákna

Disperze se řadí k nejdůležitějším parametrům optických vláken. Určuje šířku přenášeného pásma, a tím i přenosovou rychlost.[7]

#### 3.7.1 Vidová disperze

Vidová disperze se projevuje u MM vláken. Při šíření více paprsků dorazí každý z paprsků na konec vlákna v jiný časový okamžik z důvodu rozdílných délek drah. Tento jev se projevuje u delších vláken (1 km a víc), za vzniku roztažení obdelníkových impulsů v čase tak, že zasahují od sousedních impulsů a mění vzhled přijímaného signálu od vysílaného. Vidová disperze omezuje šířku přenášeného pásma, přenosovou rychlost i vzdálenost, na kterou data můžeme posílat. Aby měly impulzy na výstupu vlákna vhodný tvar pro jejich detekci, nemohou mít libovolný kmitočet. **Vidovou disperzi značně zmenšuje použití gradientního (postupného) indexu lomu v jádře vlákna.** Typická hodnota vidové disperze pro MM vlákno se skokovým indexem lomu jádra je 20 ns/km (šířka pásma do desítek MHz·km), kdežto pro vlákno s gradientním (postupným) indexem lomu jádra je tato hodnota 50 ps/km (s šířkou pásma jednotky GHz·km). **U SM vláken vidová disperze zcela odpadá (z důvodu šíření jediného paprsku).**[7][9]

#### 3.7.2 Chromatická disperze

Žádný zdroj světelného záření nefunguje tak, aby vyzařoval pouze jednu jedinou vlnovou délku. **Záření ze zdroje obsahuje celé spektrum vlnových délek, a každá složka tohoto spektra se ve vlákne šíří jinou rychlostí** (s vlnovou délkou se mění index lomu), což má za následek časové rozestupy jednotlivých vlnových délek na konci vlákna. **Chromatická disperze se projevuje jak u MM, tak i SM vláken.** Potřeba měřit chromatickou disperzi přišla s narůstající potřebou přenosových kapacit a nástupem systémů, které využívají hustého vlnového multiplexu DWDM. S vývojem technologie optických vláken se přišlo na způsoby, jak na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm eliminovat chromatickou disperzi. Problém je s již položenými kabely, které obsahují starší vlákna bez této technologie. Nejpopulárnějším řešením se stala tzv. pasivní optická kompenzace, při které se využívají speciální kompenzační vlákna DCF (Dispersion Compensating Fibers) s vysokou hodnotou záporné chromatické disperze, které se napojuje

na konec vlákna (v podobě namotané „cívky“ o délce zhruba 1/6 skutečné délky vlákna). Chromatická disperze ovlivňuje šířku kmitočtového pásma vlákna, tedy i vzdálenost, na jakou můžeme posílat data. Čím lepší zdroj záření, tím menší chromatická disperze (obecně jsou laserové zdroje lepší než zdroje LED).[9][7]

### 3.7.3 Polarizační vidová disperze

**Polarizační vidová disperze (PMD - Polarization Mode Dispersion) se projevuje u SM vláken.** Paprsek, který se šíří SM vláknem, je složen ze dvou vzájemně kolmých polarizačních rovin. Jakákoliv kruhová nesymetrie (vzniklá při výrobě, mikroohybem, montáží, vnějšími silami apod.) způsobí změnu rychlosti šíření polarizací a následné zkreslení signálu. **Polarizační vidová disperze se stává nezanedbatelnou při rychlostech 2,5 Gb/s a víc** a může mít vliv na širokopásmové analogové přenosy. Limitní hodnoty PMD jsou popsány v doporučení ITU-T G.697.[7][9]

### 3.8 Parametr MFD

Parametr MFD (Mode Field Diameter) udává výrobce pro SM vlákna. Jedná se o konstantu, která udává šířku (podobnou průměru jádra vlákna, přičemž platí, že je MFD vždy větší než průměr jádra), ve které je intenzita přenášeného optického záření větší nebo rovna 0,135 z maximální intenzity, tj.  $I(\text{MFD}) \geq 0,135 \cdot I_{\max}$ . Intenzitu záření popisuje Gaussův model, a velmi úzce odpovídá změřeným výsledkům. Čím je vlnová délka paprsku menší, tím menší má paprsek průměr a zmenšuje se i MFD.

Tento parametr je důležitý také pro výpočet útlumu nepřízpusobením dvou spojovaných vláken se stejným geometrickým rozměrem, ale různým parametrem MFD.[9]

### 3.9 Typy vláken

Vlákna rozdělujeme na jednovidová (SM) a mnohovidová (MM). MM vlákna dále dělíme na ty se skokovou změnou indexu lomu, a na vlákna s gradientní změnou indexu lomu. Existuje velké množství typů vláken pro širokou oblast aplikací.

#### 3.9.1 Jednovidová vlákna

Průměr jádra SM vláken je v rozmezí 7-9  $\mu\text{m}$ , průměr pláště mají 125  $\mu\text{m}$ , a průměr primární ochrany 250  $\mu\text{m}$ . Vláknem se vyrábí výhradně z křemenného skla. Při vyšších přenosových rychlostech ovlivňuje datové systémy polarizační vidová disperze. Vláknem je vhodné pro dálkové komunikace a trasy s požadavkem na vysokou spolehlivost a vysoké přenosové kapacity. SM vlákna se obecně zabývají doporučení ITU-T G.652 až G.657.

Mezi hlavní vlastnosti SM vláken patří:

- **Nejnižší útlum** ze všech druhů optických vláken (dosah desítky km bez zesilovačů či opakovačů)
- **Největší šířka pásma** ze všech druhů optických vláken
- **Velmi malá disperze** (+ absence vidové disperze)
- Malá hodnota NA - složité navazování paprsku do vlákna
- Jako zdroj záření je zpravidla použita laserová dioda
- Vlnová délka 350 až 1800 nm (v praxi nejčastěji 1310 a 1550 nm)

Při vlnové délce **1310 nm** má vlákno **nejlepší přenosové vlastnosti co se týče disperze (disperze je zde nulová)**, a typický měrný útlum 0,3 - 0,35 dB/km.

Při vlnové délce **1550 nm** má vlákno **nejlepší útlumové vlastnosti (nejmenší útlum)**, v dnešní době i pod 0,2 dB/km.[7][9]

Dle ITU-T standardizace se SM vlákna dělí následovně:[17][25]

- vlákno **G.652** - je označováno jako NDSF (Non-dispersion-shifted Fiber), jedná se o starší vlákno z 80. let 20. století, které je optimalizováno pro vlnovou délku 1310 nm. Dále se dělí na A, B, C a D specifikace. Vlákna C a D mají snížený obsah vodních par (Water Peak) při vlnové délce 1550 nm a jsou vhodná pro systémy využívající CWDM (Coarse WDM)
- vlákno **G.653** - je označováno jako DSF (Dispersion-shifted Fiber), vlákno má sníženou hodnotu disperze pro oblast vlnových délek v oblasti 1550 nm. Dále je v této oblasti také snížen útlum, vlákno je tedy vhodné pro přenos na vyšší vzdálenosti
- vlákno **G.654** - okolo vlnové délky 1300 nm vykazuje nulovou disperzi a v okolí 1550 nm minimálním útlumem. Vlákno je vhodné pro přenosové systémy vysokých přenosových rychlostí na dlouhé vzdálenosti (páteřní sítě, podmořské trasy)
- vlákno **G.655** - je označováno jako NZ-DSF (Nonzero Dispersion-shifted Fiber), vlákno je vhodné pro zaoceánské trasy s využitím DWDM (Dense WDM) multiplexu při rychlostech 10 Gbit/s a výš v rozmezí vlnových délek 1530 až 1625 nm
- vlákno **G.657** - je označováno jako bend-insensitive fiber, tedy vlákna, která jsou méně citlivá na zvýšení útlumu při ohybech

### 3.9.2 Mnohovidová vlákna

MM vlákna mají obecně větší průměr jádra než SM vlákna (50 či 62,5  $\mu\text{m}$ ). Oproti výhradně skleněným SM vláknům se vyrábějí také z plastových materiálů. MM vlákna se obecně zabývá doporučení ITU-T G.651, resp. G.651.1.

Mezi hlavní vlastnosti MM vláken patří:

- Větší útlum oproti SM vláknům
- Výskyt vidové disperze (viz. 35)
- Větší hodnota NA oproti SM vláknům - lehčí navázání paprsků do vlákna
- Jako zdroj záření lze mimo laserovou diodu použít i LED diodu
- Větší rozměry vlákna, snadnější spojování vláken

#### **MM vlákna se skokovou změnou indexu lomu:**

Mají vlivem vidové disperze nejnižší šířku pásma a proto je nelze použít pro přenosy dat na delší vzdálenosti. Vzhledem k velkému průměru jádra (50 až 2000  $\mu\text{m}$ ) jsou tato vlákna vhodná pro přenos laserových paprsků o vysokém výkonu (v rámci opracování materiálů, v medicíně apod.), jakožto vláknové senzory, či pro komunikace na krátké vzdálenosti. Mají snadnou výrobu a jednoduše se s nimi manipuluje. Z hlediska použitých materiálů se vyrábí v několika typech:

- Typ sklo-sklo = kde je jádro i plášť tvořeno sklem - nejkvalitnější a nejdražší varianta
- Typ HCS/HPCS (Hard Clad Silica/Hard Plastic Clad Silica) = kde je jádro tvořeno sklem a plášť tvrdým plastem - vlákna se zhoršenými optickými vlastnostmi, nicméně jsou levnější než typ sklo-sklo
- Typ POF (Plastic Optical Fiber) = kde je jádro i plášť tvořeno plastem - velký útlum, malá šířka pásma, malé přenosové rychlosti, jsou levná
- Kapalinové vlákna s jádrem tvořeným kapalinou
- Dutá vlákna s jádrem tvořeným vzduchem - použití v IR oblasti

Tato vlákna mají útlum řádově v jednotkách dB/km a šířku pásma v desítkách MHz·km.

#### **MM vlákna s gradientní změnou indexu lomu:**

Gradientní (postupná) změna indexu lomu jádra vlákna u MM vláken podstatně zmenšila vidovou disperzi. Výsledkem je výrazné zvětšení šířky pásma. Vyznačují se menší disperzí, menším útlumem a částečně složitější výrobou a manipulací. Toto vlákno se označuje jako kompromis mezi vlákny jednovidovými a vlákny mnohovidovými se skokovou změnou indexu lomu jádra. Nejpoužívanější MM gradientní vlákna mají průměr jádra 50, resp. 62,5  $\mu\text{m}$  a průměr pláště 125  $\mu\text{m}$ . Jádro i plášť je tvořeno sklem s příměsí prvků (germanium, bor, fosfor, fluor), které přizpůsobují index lomu.

Tato vlákna jsou používána pro datové přenosy na vzdálenosti řádově kilometrů, méně často pro senzorové systémy. Vzhledem k malému průměru jádra nejsou vhodné pro výkonové přenosy.[7][9]

## 4 Hybridní opticko-metalické sítě

Jak už název napovídá, hybridní opticko-metalická síť je taková síť, která je z části tvořena optickým a z části metalickým přenosovým médiem. V dnešní době je snaha používat metalické vedení pouze na kratší vzdálenosti, řádově jako poslední kilometry přístupové sítě. Cílem hybridních sítí je snížit náklady na budování nové optické sítě na místo staré metalické. Hybridní sítě se dle standardu ITU-T L.47 obecně dělí na dva druhy:[22]

- **HFC-S** - jako metalické médium je použit kabel se symetrickými páry
- **HFC-C** - jako metalické médium je použit koaxiální kabel

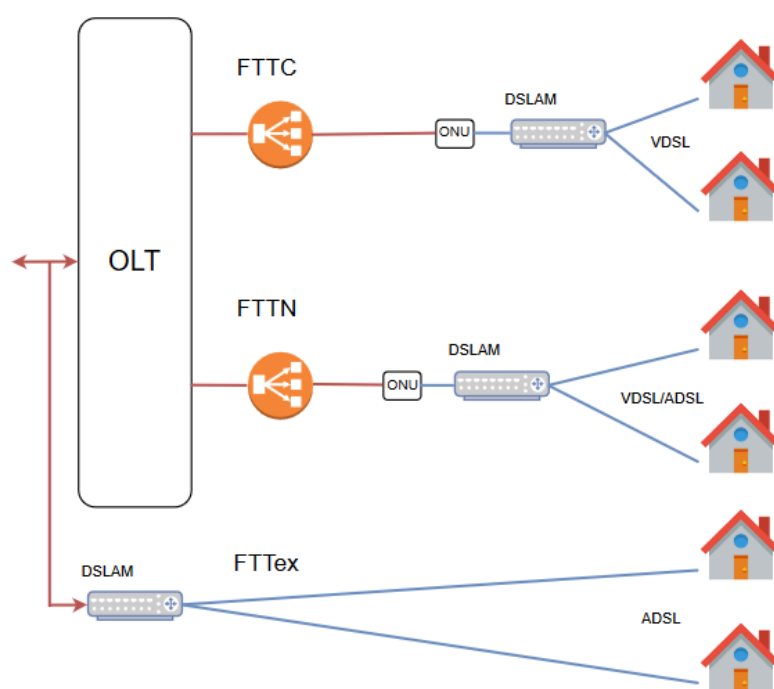
### 4.1 Hybridní síť se symetrickými páry

HFC-S sítě ve většině případů používají telefonní kroucené dvojlinky ze starší POTS sítě. K uživatelům se mohou postupně dostávat novější služby vyžadující vyšší přenosové rychlosti a menší chybovost, a to především díky novým způsobům datové komprese (JPEG, MPEG apod.) a nasazené přenosové technologii (HDSL, ADSL, VDSL). Existuje mnoho variací toho, jak taková hybridní síť může vypadat a co je schopna nabídnout (přenosové rychlosti, zpoždění, služby apod.). Velice záleží na tom, jak moc do sítě zasahuje optické vlákno a jaká délka (popř. kvalita) metalického vedení je mezi DSLAMem a účastníkem. Na delší metalické úseky se hodí technologie ADSL, a na kratší vzdálenosti technologie VDSL. Poskytovatelé pak mohou také zkrátit vzdálenost účastníku od DSLAMu představeným rDSLAMem, který se vyplácí zejména v hustě obydlených oblastech s vysokou návratností investic za vybudování trasy, výkopové práce a sestavení samotného rDSLAMu. Co se týče nově vznikajících budov, domů a bytových infrastruktur, budují se už výhradně jen optické trasy.[8][22]

V přístupových sítích se v dnešní době často setkáváme s pojmem FTTx. Zkratka FTTx označuje způsob, v jakém místě přístupové sítě je zakončeno optické vlákno. Varianty FTTx, které využívají kabely se symetrickými páry (tedy technologii xDSL), označujeme FTTC, FTTN a FTTex. V části sítě s optickým médiem je v praxi často využita technologie PON (tedy síť P2MP - Point to Multi Point), nejčastěji založená na Ethernetu (EPON - Ethernet PON, 10G-EPON apod.).[8]

Na obrázku 7 jsou tyto základní varianty zobrazeny. Červené propojovací čáry znázorňují optické médium, modré propojovací čáry metalické médium. Blok OLT (Optical Line Termination) označuje Optické linkové zakončení a slouží jako zakončení linky na straně poskytovatele. Blok ONU (Optical Network Termination) označuje Optickou síťovou jednotku, která zakončuje optickou část sítě na straně zákazníka. Mezi bloky OLT a ONU je tzv. Splitter, díky kterému se zpro středkovává šířka pásma vlákna více uživatelům. DSLAM funguje jako sdružovač jednotlivých účastníků.

- **FTTC** - při vzdálenostech typicky 100 až 300 metrů od koncových účastníků lze ONU spolu s DSLAMem instalovat do venkovního rozvaděče k větší skupině budov. Při této vzdálenosti je obvykle nasazována technologie VDSL, resp. VDSL2.
- **FTTN** - při vzdálenosti 300 metrů a více (mezi ONU a koncovými účastníky) se mluví o variantě FTTN. Při vyšších vzdálenostech je místo technologie VDSL, resp. VDSL2 nasazována technologie ADSL2+.
- **FTT<sub>ex</sub>** - optické vlákno je přivedeno do ústředny nebo vzdálené účastnické jednotky, která obsahuje DSLAM. Od DSLAMu vede k jednotlivým účastníkům metalické médium. Při těchto vzdálenostech se využívá technologie ADSL, resp. ADSL2+.



Obrázek 7: Základní varianty FTTx využívající technologii xDSL

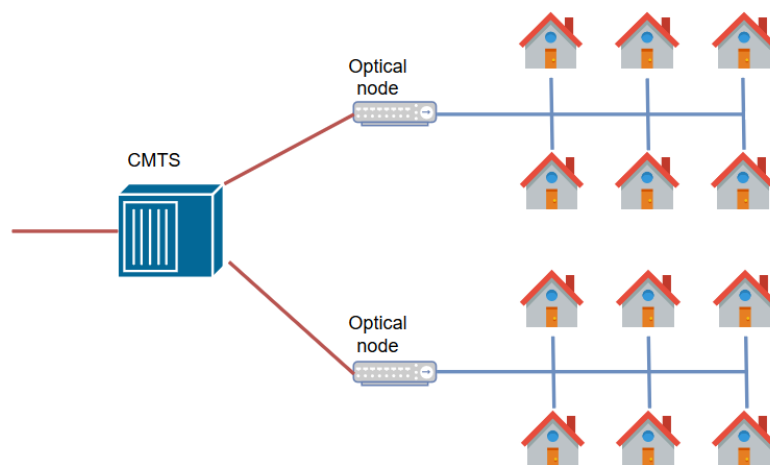
Další varianty FTTx, jako např. FTTH, FTTH, FTTO či FTTB jsou zakončeny buď těsně u budovy, v jejím sklepení, či přímo u koncového účastníka. V takovém případě se často používají metalické rozvody budov a na nich nasazená technologie Ethernet (v závislosti na realizaci sítě a zaplaceném tarifu jsou obvyklé rychlosti 100 Mbit/s a 1000 Mbit/s).[8]

## 4.2 Hybridní síť s koaxiálním kabelem

Stejně jako byly v minulosti budovány telefonní sítě s kroucenými páry, na kterých se dnes provozuje internetové připojení (digitální účastnické přípojky), byly také budovány rozvody s koaxiálními kabely pro distribuci analogové kabelové televize CATV. Po čase se začalo přemýšlet nad



využitím těchto kabelů k dalším, nově vznikajícím datovým a interaktivním službám. Standardem pro tyto služby se stal DOCSIS. Hraniční bod mezi páteřní sítí a přístupovou sítí (u HFC-S sítě označován jako OLT) je zde CMTS (Cable Modem Termination System). Propojení k páteřní sítí je obvykle realizováno protokolem IP. Pomocí slučovačů se v CMTS dále navazuje vlastní televizní vysílání. Od CMTS vede směrem k účastníkům optické vlákno zakončené v optických uzlech (Optical node). V optickém uzlu je signál převeden z optické na elektickou podobu, zesílen a otestován, a dále poslán po koaxiálních rozvodech k účastníkům. Podle hustoty obydlení je do jednoho optického uzlu připojeno 250-500 uživatelů. Koaxiální kabel je zakončen u účastníků (dům, byt apod.) v kabelové zásuvce, do které je připojen TV přijímač a datový modem CM. CM slouží jako domácí (LAN) brána do internetu. Na obrázku 8 lze vidět topologii HFC-C sítě. Modré čáry značí koaxiální kabel, červené optické vlákno. Mezi optickým rozvaděčem a účastnickou zásuvkou mohou být i stovky metrů. V této části trasy bývají rozbočovače a zesilovací prvky.[8]



Obrázek 8: Obecné schéma HFC-C sítě

Jelikož má koaxiální kabel široké frekvenční pásmo, může pojmout mnoho služeb současně (pomocí metody FDD). Rozdělení frekvenčního pásma podle účelu dle standardu ITU-T L.47:

- **0 až 40 MHz - UPSTREAM:** Telefonie, upstream datová komunikace, kontrolní signály pro VOD, řídicí signály
- **40 až 50 MHz:** Ochranné pásmo mezi UPSTREAM a DOWNSTREAM směrem přenosu
- **50 až 450 MHz - DOWNSTREAM:** Televizní analogové veřejné vysílání a rádiové FM vysílání
- **450 až 550 MHz - DOWNSTREAM:** Televizní digitální vysílání
- **550 až 862 MHz - DOWNSTREAM:** Telefonie, downstream datové komunikace, VoD (Video on Demand)

Nicméně je toto rozdělení frekvenčního pásma pouze orientační, různé státy a regiony používají rozdílné standardy a pásma (např. z důvodu šířky pásma televizního kanálu - USA má 6 MHz, Evropa 8 MHz).[8] Co se týče přenosových rychlostí jednotlivých DOCSIS specifikací, ty ukazuje tabulka

DOCSIS	Rok vydání	Max. Downstream rychlost	Max. Upstream rychlost
1.0	1997	40 Mbit/s	10 Mbit/s
1.1	2001	40 Mbit/s	10 Mbit/s
2.0	2002	40 Mbit/s	30 Mbit/s
3.0	2006	1.2 Gbit/s	200 Mbit/s
3.1	2013	10 Gbit/s	1-2 Gbit/s
3.1 Full Duplex	2017	10 Gbit/s	10 Gbit/s

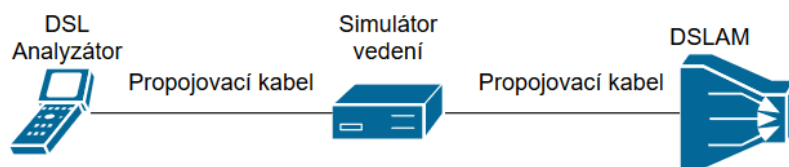
Tabulka 4: Tabulka DOCSIS specifikací[23]

## 5 Měření metalické části sítě

V praktické části měření parametrů metalické části sítě bylo zvoleno měření digitálních účastnických přípojek DSL. Jedná se o technologii ADSL2+ s frekvenční variantou Annex B (ADSL2+ over ISDN), a o technologii VDSL2 s frekvenční variantou 30a (VDSL2 se šířkou pásma 30 MHz). Měření přípojky ADSL2+ proběhlo pro neomezenou rychlost a také pro rychlost nastavenou měřenému portu v nastavovacím prostředí DSLAMu. Měření přípojky VDSL2 proběhlo pro maximální rychlost přenosu. Veškerá měření digitálních účastnických přípojek proběhla v učebně POREB211.

### 5.1 ADSL2+

Při měření digitální účastnické přípojky ADSL2+ bylo použito zapojení z obrázku 9.



Obrázek 9: Topologie použitá při měření DSL parametrů

#### DSL analyzátor

Jakožto analyzátor bylo použito zařízení MTTplus 520 od firmy VeEX. Měření bylo nastaveno pro technologii ADSL2+ s frekvenčním plánem Annex B. Dále byl nastaven paketový mód přenosu. Propojovací kabel byl připojen do konektoru *Line 2*.

#### Simulátor vedení

Simulátor vedení byl použit DLS-6900 od firmy Spirent. Simulátor umí pracovat podle evropské a americké normy. Evropská norma označuje simulovaný kabel jako PE04 kabel s průměrem 0,4 mm. Při použití této normy se vzdálenost nastavuje mezi 0 až 7000 metry s krokem 100 metrů. Americká norma označuje simulovaný kabel jako 26 AWG kabel s průměrem 0,4 mm. Při použití americké normy se vzdálenost nastavuje mezi 0 až 21 000 stopami (0 až 6400 metrů) s krokem 250 stop (76.2 metrů). **Pro všechna měření byla použita evropská norma PE04.** U obou norem lze dále nastavovat hodnotu AWGN šumu. AWGN šum lze nastavovat v rozmezí -140 dBm/Hz až -90 dBm/Hz s krokem 0.25 dBm/Hz.

#### DSLAM

DSLAM je použit IES-1000 od firmy ZyXEL s přídatnou kartou AAM1212-53, která má 12 portů s možnostmi nastavení ADSL/ADSL2/ADSL2+. Měření bylo standard ADSL2+ Annex B. Propo-

jovací kabely byly použity UTP Cat5e s co nejmenší délkou, aby neovlivňovaly výsledky měření.

### Ukázka náměru

Následuje ukázka náměru pro nastavenou vzdálenost 0 metrů na simulátoru vedení. Nastavení DSLAMu je součástí přílohy C. **Ostatní náměry jsou k dispozici jako přípojené soubory k bakalářské práci.** V tabulce 5 lze vidět nastavení DSL analyzátoru pro dané měření. Nastavení modemu jakožto účastnického (XTU-Remote), DSL mód jakožto ADSL (analyzátor podporuje taky měření VDSL), standard (varianta) ADSL2+ Annex B (ADSL2+ over ISDN) a metoda testu, jež se po změření ukončí.

Modem type	XTU-R
DSL Mode	ADSLx
Standard	ADSL2+ Annex B
Test Mode	Terminate

Tabulka 5: Nastavení analyzátoru při měření technologie ADSL2+

V tabulce 6 lze vidět tabulku naměřených hodnot. Vidíme zde sloupce pro sestupný směr přenosu (Downstream) i vzestupný směr přenosu (Upstream).

	Downstream	Upstream
Rate (kbps)	25783	1375
Max (kbps)	25828	1399
Capacity (%)	99	98
SNR Margin (dB)	6.80	8.70
Attenuation (dB)	0.00	0.00
Delay (ms)	0.25	0.50
Tx Power (dBm)	6.70	8.40

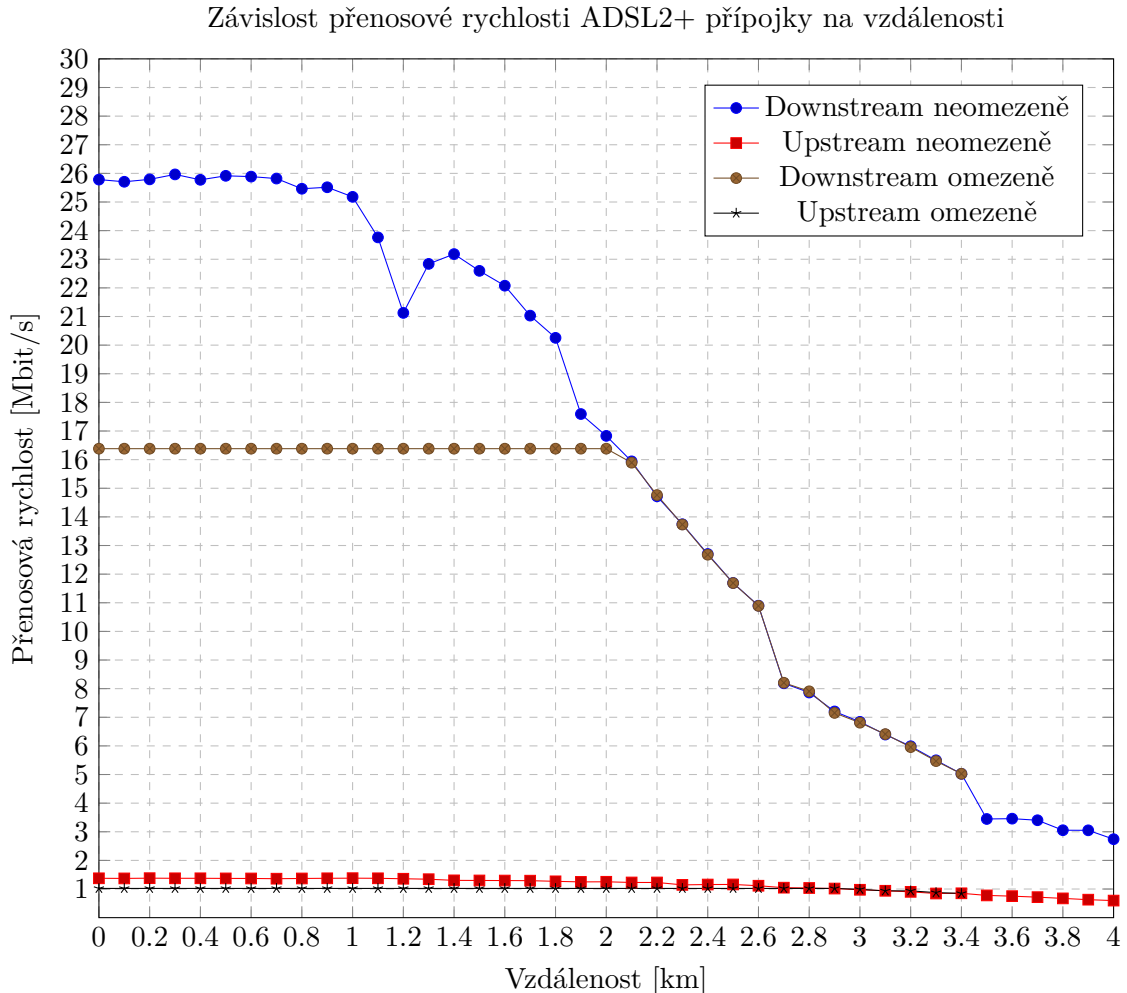
Tabulka 6: Výsledky měření analyzátozem při délce vedení 0 metrů

Tabulka obsahuje sloupce pro oba směry přenosu a pro ně příslušné základní parametry přenosu. Rate udává zprůměrovanou přenosovou rychlost, Max je teoretická maxiální přenosová rychlost pro změřené parametry přenosové cesty, Capacity je poměr Rate a Max, SNR Margin udává rozdíl mezi změřenou hodnotou SNR a SNR, která je potřebná pro synchronizaci. Je žádoucí aby SNR Margin byl co největší. Attenuation udává útlum přenosové cesty. Delay udává zprůměrované zpoždění dsl rámců. Tx Power udává vysílací výkon v jednotlivých směrech.[21]

### Tabulky a grafy

Tabulky vybraných hodnot (přenosová rychlost a útlum) pro neomezenou i omezenou přenosovou rychlost jsou z důvodu své velikosti k vidění v příloze A. Z těchto tabulek jsou zde vyobrazeny

dva grafy - graf závislosti přenosové rychlosti na vzdálenosti (pro neomezenou i omezenou rychlost) a graf závislosti útlumu na vzdálenosti (z důvodu minimálních odchylek v naměřených hodnotách útlumu je tento graf zobrazen pouze pro měření neomezené rychlosti).

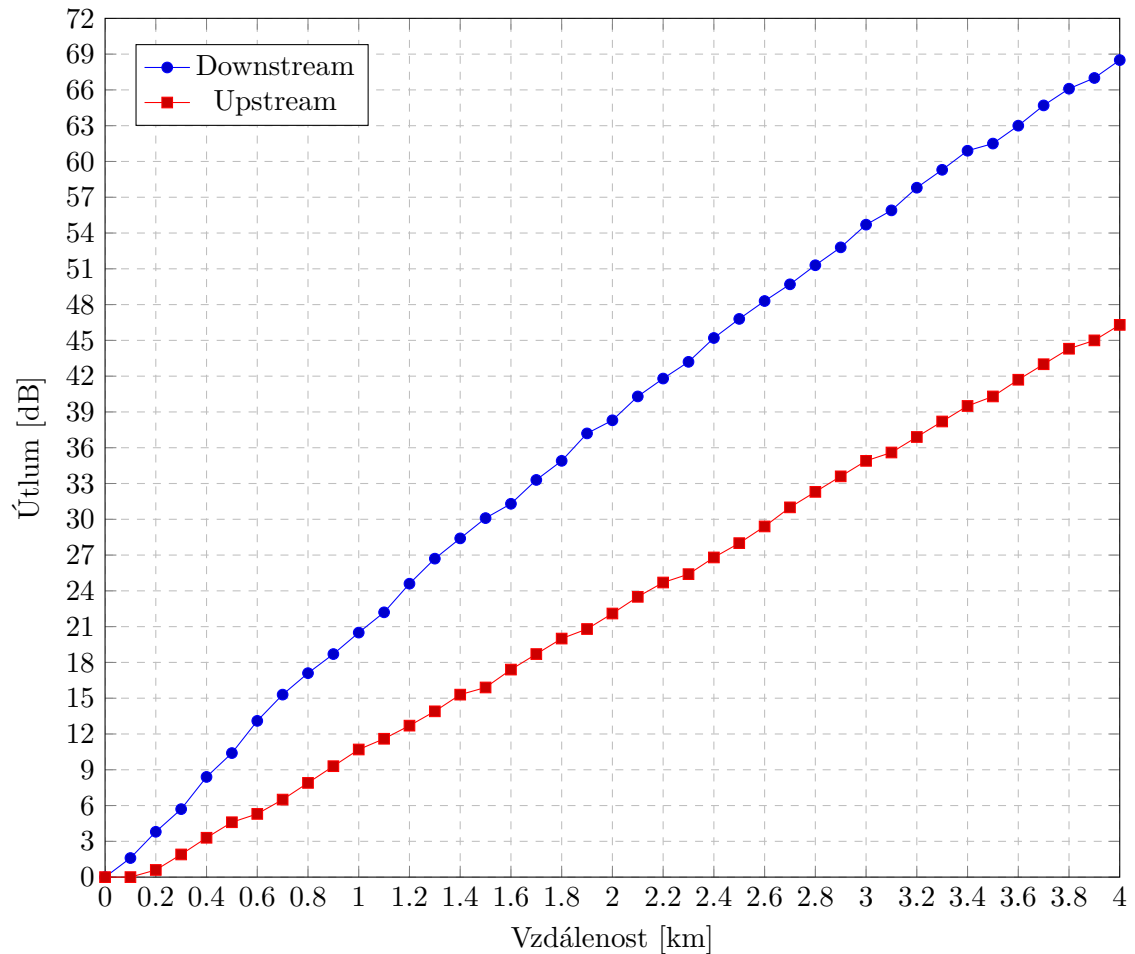


Měření s neomezenou rychlostí proběhlo do vzdálenosti 4000 metrů, kde se přenosová rychlost sestupná (Downstream) dostala pod hranici 3 Mbit/s. Měření omezené rychlosti proběhlo do vzdálenosti 3400 metrů, kde DSLAM přestal vysílat data z důvodu překročení nastavených limitních hodnot pro směr sestupný (4096 kbit/s). Při neomezené rychlosti se přípojka na prvním kilometru drží svého technického maxima a pak začíná pomalu klesat. Při omezené rychlosti si přípojka drží nastavenou rychlost (16384 kbit/s) do vzdálenosti 2000 metrů a pak z důvodu útlumu začne klesat. Přenosová rychlost pro směr vzestupný (Upstream) je pro oba případy téměř konstantní a pohybuje se kolem hodnoty 1 Mbit/s.

Útlum přípojky je pro omezenou i neomezenou rychlost v podstatě stejný, jelikož omezení rychlosti na DSLAMu nemá na útlum vliv. Sestupný přenos má vyšší útlum než vzestupný, jelikož se nachází výše ve frekvenčním spektru dané technologie a při vyšších kmitočtech vedení více

tlumí.

Závislost útlumu ADSL2+ přípojky na vzdálenosti



## 5.2 VDSL2

Při měření VDSL přípojky bylo použito stejné zapojení, jako při měření přípojky ADSL2+ (9). Použitý analyzátor a DSLAM podporují frekvenční plány pro VDSL i VDSL2. Z možných frekvenčních plánů (8a, 8b, 8c, 8d, 12a, 12b, 17a, 30a) byl měřen plán 30a (30 MHz pásmo). Tento plán by z nabízených plánů měl dosahovat nejvyšší přenosové rychlosti za cenu nejkratšího dosahu (nejmenší překlenutelná vzdálenost). Měření proběhlo pouze pro jednu přenosovou rychlost, a to maximální (nastavení portu DSLAMu povolilo maximální přenosovou rychlost 110/110 Mbit/s).

### DSL analyzátor

Pro měření 30a plánu byl použit stejný analyzátor, jako pro měření ADSL2+ přípojky, tedy MTTplus 520 od firmy VeEX. Měření bylo nastaveno pro technologii VDSL2 s frekvenčním plánem 30a. Dále byl nastaven paketový mód přenosu. Propojovací kabel byl připojen do konektoru *Line 1*.

### Simulátor vedení

Simulátor vedení byl použit stejný jako u měření ADSL2+, tedy DLS-6900 od firmy Spirent. Rovněž na něm byl zvolen standart PE04, a vzdálenost se zvyšovala s krokem 100 metrů.

### DSLAM

Jako DSLAM je použit VES1724-56 od firmy ZyXEL. Jedná se o 24 portový VDSL/VDSL2 DSLAM. **Po celou dobu měření byl použit port č. 1.**

Propojovací kabely byly použity UTP Cat5e s co nejmenší délkou, aby neovlivňovaly výsledky měření.

### Tabulky a grafy

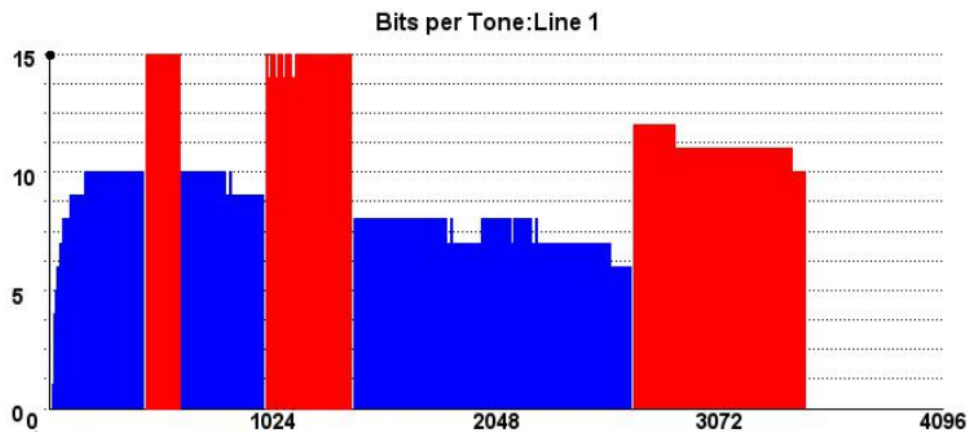
Vzdálenost [m]	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Rychlost [kbit/s]	Útlum [dB]	Rychlost [kbit/s]	Útlum [dB]
0	109998	0,8	100000	0,0
100	109995	6,7	100001	6,9
200	109999	12,3	93659	16,4
300	109994	15,4	66954	25,4
400	91511	17,6	47469	25,7
500	70161	20,0	40251	32,4
600	59806	22,1	31542	39,2
700	51009	23,7	21574	46,3
800	43138	26,6	13505	52,9
900	41687	28,1	9312	60,2
1000	35722	29,9	7374	53,3
1100	30118	31,4	5226	59,1

Tabulka 7: Tabulka naměřených hodnot VDSL2 přípojky se 30a frekvenčním plánem

Uvnitř DSLAMu lze nastavit maximální přenosovou rychlost pro jeden port na symetrických 110/110 Mbit/s. Jelikož VDSL2 se 30 MHz pásmem je schopno vyšších přenosových rychlostí, prvních 300 metrů trasy nesnižuje svou rychlost i v případě zvyšujícího se útlumu.

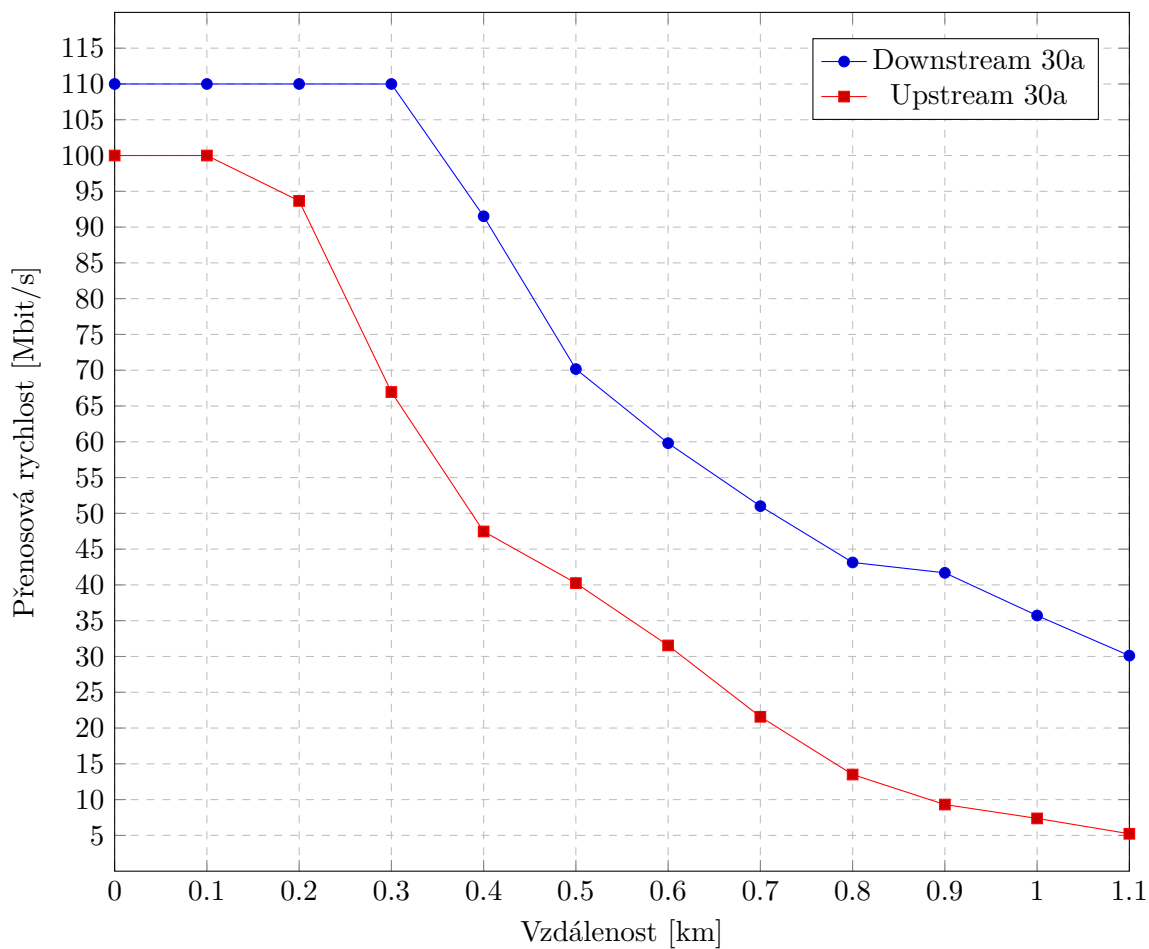
Měření končí po 1100 metrech z důvodu velkého útlumu (60 dB) na upstream směru přenosu. Upstream je tlumen více z toho důvodu, že je ve frekvenčním plánu frekvenčně nejdále (18,1 až 30 MHz pro US3 v obrázku 5).

Obrázek 10 ukazuje jednotlivé tóny DMT modulace technologie VDSL2. Měřený plán 30a disponuje 3478 tóny (ADSL2+ má 512 tónů), z nichž každý má šířku pásma 8,625 kHz (ADSL2+ má 4,3125 kHz).[28]



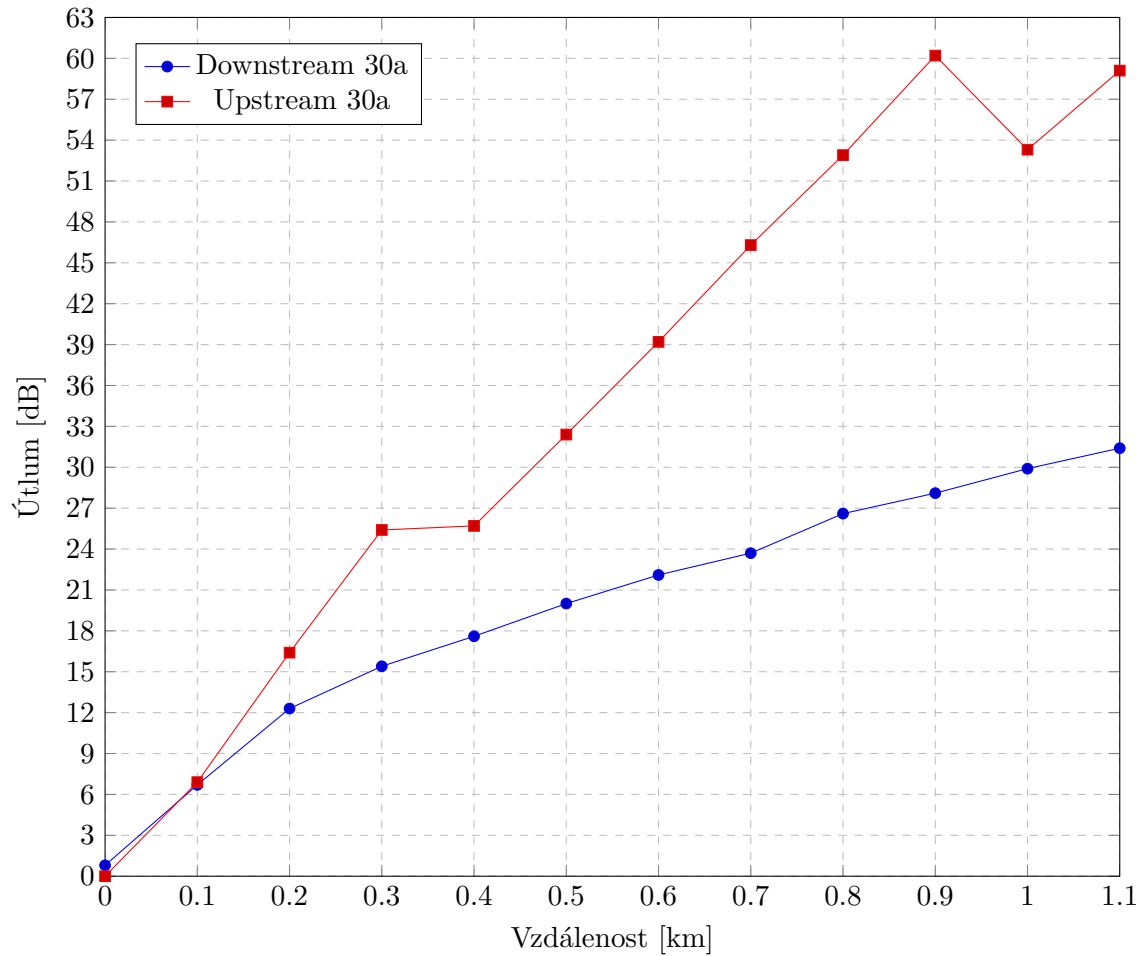
Obrázek 10: Bitové ohodnocení tónů DMT modulace technologie VDSL2 při 0 metrech

Závislost přenosové rychlosti VDSL2 přípojky na vzdálenosti





Závislost útlumu VDSL přípojky na vzdálenosti



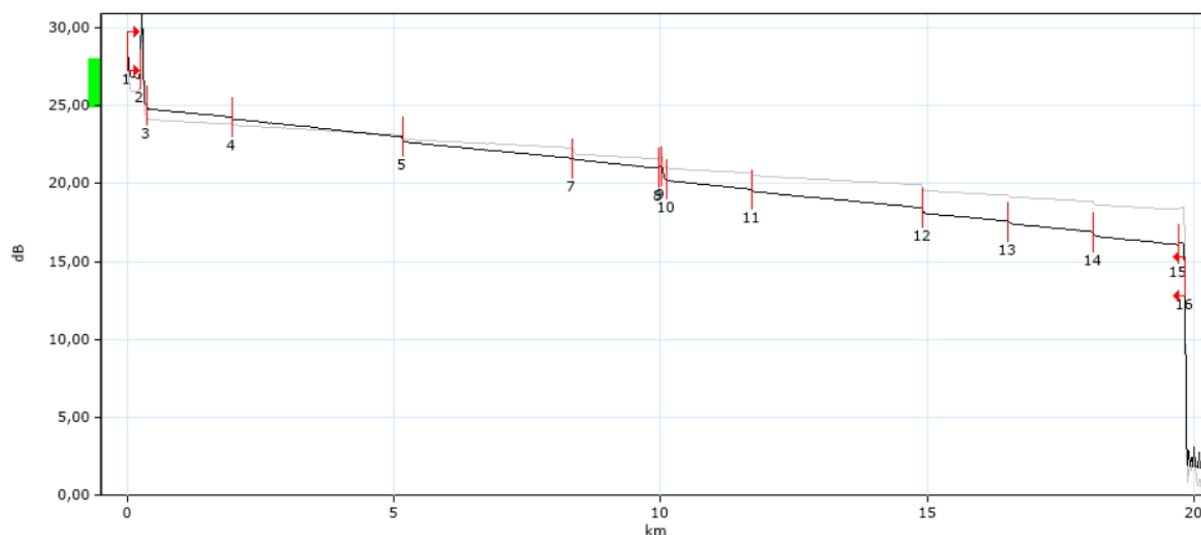
Oba grafy závislosti přenosové rychlosti a útlumu na vzdálenosti potvrzují, že je upstream tlumen více, vlivem čehož rychleji klesá jeho přenosová rychlost. Dále ukazují, že do kratších vzdáleností (500 metrů) je systém schopen poskytnout uspokojující přenosovou rychlost (70/40 Mbit/s při 500 metrech). Pro představu uvádím, že jeden televizní kanál s rozlišením 1920x1080 bodů (Full HD) a 25 snímky za sekundu vyžaduje při kompresní technice MPEG-4 (Moving Picture Experts Group) přenosovou rychlost 10,65 Mbit/s.[24]

## 6 Měření základních parametrů optické trasy

V praktické části měření parametrů optické části sítě bylo zvoleno měření chromatické a polarizační vidové disperze, a měření pomocí metody OTDR. Měření proběhlo na jednovlnovém vlákně ve školní laboratoři (vlákno typu G.652.A). Pomocí již zbudovaných úseků byly sestaveny a změřeny 5, 10, 15 a 20 km trasy.

### 6.1 OTDR

Pro měření metodou OTDR byl použit reflektometr Exfo Max-730B-M1-EA. K reflektometru je připojeno předřadné vlákno, a za ním měřená trasa. Měření proběhlo pro vlnové délky 1310 a 1550 nm. Vyšetření trasy pomocí metody OTDR využívá dva jevy - **Fresnelův odraz** a **Reyleighuv rozptyl**. Jelikož je část energie světelného paprsku odražena od čela vlákna na začátku trasy, je reflektometr „zaslepen“, tj. přijímač je přehlcen energií odrazu a neumí zpracovávat ostatní odrazy. Při tomto jevu je část trasy považována za tzv. **mrtvou zónu**, ve které nevíme, co se děje. Tato mrtvá zóna se objevu při každém velkém odrazu světelné energie, hlavně tedy na čele vlákna a na konektorových spojech. Abychom mohli korektně změřit celou trasu i se začátkem, používáme tzv. **předřadné vlákno**. Vlastnosti předřadného vlákna máme změřeny předem, umísťujeme jej na začátek trasy a do samotné trasy ho nezapočítáváme, slouží pouze pro odstranění počáteční mrtvé zóny ze začátku měřené trasy. Použité předřadné vlákno je délky 237 metrů. Pokud vznikne mrtvá zóna za konektorovým spojením v již postavené trase, může zastínit část trasy a zapříčinit přehlédnutí chyby v této části trasy. Tento problém lze vyřešit změřením trasy metodou OTDR i z druhé strany a porovnání náměrů v té části, kde se mrtvá zóna vyskytuje.[14]



Obrázek 11: Zobrazení 20 km trasy pomocí metody OTDR

Na obrázku 11 je vidět výstup měření 20 km trasy reflektometrickou metodou měření. Na horizontální ose je vyznačena vzdálenost v km, na vertikální výkonová úroveň signálu v dB. Graf postupně klesá s tím, jak se energie světelného paprsku při průchodu vláknem zmenšuje. Na obrázku jsou při zvětšení snadno rozpoznatelné náhlé poklesy výkonové úrovně a menší a větší špičkové hodnoty. Poklesy úrovně bez špičkových hodnot značí ve většině případů svary. Pokles úrovně spolu se špičkou značí výskyt konektoru. A největší špičky v grafu značí začátek a konec trasy. Je-li při měření trasy použito předřadné vlákno, je třeba vědět jeho délku a při analýze OTDR náměru jej do trasy nezapočítávat, tedy uvažovat měřenou trasu až po délce předřadného vlákna a propojovacího vlákna.[14]

Časová délka pulzu je při OTDR měření velice důležitá, jelikož velmi ovlivňuje rozlišovací schopnosti reflektometru. Při nastavení krátké doby pulzu se může stát, že pulzu dojde energie a nedostane se na konec vlákna, nebo budou odražené hodnoty špatně zpracovány. Při nastavení příliš dlouhé doby pulzu se nám může při velkých odrazech stát, že vznikne příliš velká mrtvá zóna za místem odrazu. V tomto případě bychom si mohli znepřístupnit pohled na případné chyby v tomto zastíněném úseku trasy.[14]

V tabulce 8 jsou uvedeny základní měřené přenosové parametry trasy, tj. útlum, resp. měrný útlum, a útlum odrazu. Jednotlivé hodnoty jsou výsledkem vždy dvou naměřených hodnot, jelikož byla každá trasa měřena z obou stran. Veškeré náměry jsou k dispozici v příloze bakalářské práce.

		Útlum [dB]		Měrný útlum [dB/km]		Útlum odrazu [dB]	
Trasa	Délka [km]	1310 nm	1550 nm	1310 nm	1550 nm	1310 nm	1550 nm
5 km	4,992	2,409	2,035	0,483	0,408	35,5	37,74
10 km	9,772	6,467	5,599	0,661	0,573	37,68	40,52
15 km	14,76	9,867	8,982	0,668	0,609	39,61	42,21
20 km	19,473	11,021	7,895	0,566	0,405	36,09	36,69

Tabulka 8: Tabulka naměřených hodnot metodou OTDR

Měření proběhlo ve školní laboratoři POREB316. Trasa 5 km byla měřena na portu 6-18. Trasa 10 km na portu 1-13. Trasa 15 km se skládá z 10km trasy (port 2-14) a 5km trasy (port 5-17). Trasa 20 km se skládá z 10km trasy (port 7-19) a 10km trasy (port 3-15).

Ve sloupci „Trasa“ je uvedena předpokládaná délka trasy, ve sloupci „Délka“ pak skutečná, změřená délka trasy. Z tabulky lze uvést, že trasy mají velkou hodnotu měrného útlumu. Pro použité SM vlákno typu G.652.A by se měl měrný útlum pro vlnovou délku 1310 nm pohybovat pod 0,5 dB/km a pro vlnovou délku 1550 nm pod 0,4 dB/km.[17] Zvýšenou hodnotu útlumu lze odůvodnit jednak počtem svarů na trase, konektorovými spoji a také tím, že je trasa již řadu

let využívána ve školním prostředí. Útlum odrazu se pohybuje také v dosti malých hodnotách, což je nejspíše způsobeno použitím PC konektorů namísto APC.

## 6.2 Chromatická disperze

Pro měření chromatické disperze byl použit zdroj záření FLS-5834a, který je speciálně uzpůsoben pro měření chromatické a polarizační vidové disperze a byl umístěn na začátek měřené trasy. Na konec měřené trasy byl připojen CD analyzátor FTB-5800.

Při měření se do nastavení zadávaly hodnoty vzdálenosti jednotlivých tras podle toho, jak je změřil reflektometr OTDR. Dále byl nastaven rozsah měřených vlnových délek od 1530 nm do 1625 nm s krokem 2 nm. Čas průměrování naměřených hodnot jednotlivých měření byl nastaven na 10 sekund.

Trasa	CD [ps/nm]	CD koeficient [ps/(nm·km)]
5 km	84,443	16,721
10 km	163,655	16,699
15 km	244,532	16,522
20 km	326,833	16,761

Tabulka 9: Chromatická disperze

V tabulce 9 jsou sepsány naměřené hodnoty pro jednotlivé trasy. **Veškeré hodnoty jsou vztaženy k vlnové délce 1550 nm.** Hodnota CD vyjádřená v ps/nm udává celkové roztažení pulsu pro danou trasu a vlnovou délku. Hodnota CD koeficient vyjádřená v ps/(nm·km) udává roztažení pulsu po průchodu 1 km vlákna. Měření proběhlo pomocí tzv. metody fázového posuvu, při níž se porovnávají fáze vstupních a výstupních paprsků. Při této metodě se před samotným měřením trasy provádí referenční měření, ve kterém není zapojena měřená trasa a změří se referenční fáze.[18]

## 6.3 Polarizační vidová disperze

Pro měření polarizační vidové disperze byl použit zdroj záření FLS-5800A, který byl umístěn na začátek měřené trasy. Na konec měřené trasy byl připojen PMD analyzátor FTB-5500B. Při měření PMD se oproti měření CD nedělá referenční měření.

Měření proběhlo 5krát pro každou délku trasy, celá tabulka hodnot je k nalezení v příloze (11). Tabulka 10 je její zkrácenou verzí, kde se pro každou trasu hodnoty zprůměrovaly.

Trasa	PMD [ps]	PMD koeficient [ps/ $\sqrt{km}$ ]
5 km	1,5839	0,7069
10 km	1,4612	0,4650
15 km	1,8064	0,4696
20 km	2,2405	0,5001

Tabulka 10: Polarizační vidová disperze

Hodnota PMD udává celkové PMD pro celou změřenou trasu. Hodnota PMD koeficient je celková PMD vztažena na jednotku délky (1 km). Jelikož je PMD na trasách delších než 10 km nelineární, provádí se jeho výpočet se  $\sqrt{km}$  a podle toho se odvíjí i uvedená jednotka ps/ $\sqrt{km}$ . Limitními hodnotami PMD pro konkrétní přenosové systémy se zabývá standard ITU-T G.697.[7]

## 7 Návrh laboratorní úlohy

Jako návrh laboratorní úlohy je jsem navázal na praktické měření digitálních účastnických linek a nazval jej **Nastavení přenosové rychlosti a ověření funkčnosti digitální účastnické linky VDSL2**. Mimo praktické měření se v zadání vyskytuje také teoretický úvod do měřené problematiky a otázky k vypracování. Snažil jsem se vytvořit takové zadání, které studenta donutí trochu se nad daným tématem zamyslet a dohledat si potřebné informace. Výstupem měření je protokol o měření, který bude mít tyto části: Zadání laboratorní úlohy, teoretický úvod k zadané problematice, schéma zapojení, použité zařízení a místo měření, postup měření, část pro tabulky a grafy z měření, závěr a odpovědi na zadané otázky, zdroje. Úloha je vhodná pro předměty Přístupové sítě nebo Telekomunikační sítě.

**Šablona zadání laboratorní úlohy je k nalezení v příloze D. Vzor vypracovaného protokolu z měření laboratorní úlohy podle dané šablony je k nalezení v příloze E. Jak šablona, tak vzorový protokol jsou k nalezení jako soubory ve formátu .doc a .pdf na CD disku připojeném k bakalářské práci.**

### 7.1 Zadání laboratorní úlohy

Zadání laboratorní úlohy je cíleno na měření přenosové rychlosti a útlumu digitální účastnické linky VDSL2 v závislosti na délce vedení. Před samotným měřením si student bude muset sám nastavit přenosovou rychlost a VDSL2 profil k portu DSLAMu, na kterém bude měřit. Po tomto nastavení si propojí DSL analyzátor ve svém pracovišti se simulátorem vedení a nastaveným portem DSLAMu. Přenosovou rychlost bude student volit mezi 60 až 100 Mbit/s pro směr sestupný (Downstream) a 20 až 100 Mbit/s pro směr vzestupný (Upstream). Tyto hodnoty jsou zvoleny jednak z toho důvodu, že školní VDSL DSLAM je schopen poskytnout maximální rychlost portu 110/110 Mbit/s, dále pak z toho důvodu, aby šlo z grafů vidět, který komunikační směr je více ovlivňován délkou vedení, na což by měl student zareagovat v závěru.

V zadání jsou také uvedeny otázky, na které bude student odpovídat v závěru protokolu. Tyto otázky jsou:

1. Co způsobilo zvětšení frekvenčního rozsahu technologie VDSL, resp. VDSL2, oproti technologii ADSL?
2. Jakou modulaci používá technologie VDSL2? Stručně jí popište.
3. Vysvětlete pojem FTTx a jeho vztah k technologii VDSL, resp. VDSL2.

V první otázce by si měl student dohledat informace k technologii ADSL a VDSL a jejich frekvenčním rozsahům. Tyto rozsahy by dále měl uvést (1,104 MHz pro ADSL a 30 MHz pro

VDSL2 30a profil) a měl by stručně popsat, že vlivem zvětšení frekvenčního rozsahu je technologie VDSL2 mnohem rychlejší než technologie ADSL, ale má mnohem menší dosah. Toto tvrzení by měl student doložit příslušnými zdroji.

K druhé otázce by měl student uvést konkrétní modulaci, kterou používá VDSL2 (standard ITU-T G.993.2 definuje pro technologii VDSL2 pouze modulaci DMT). K této modulaci by měl uvést základní údaje, popř. obrázek.

Třetí otázka by měla být zodpovězena tím stylem, že se stručně vysvětlí pojem FTTx a jeho vztah k technologii VDSL. Student vysvětlí, že se pojmem FTTx pojmenovává postup zavádění optického vlákna do přístupové sítě a to, že na posledních stovkách metrů jsou využity stávající metalické kabely se symetrickými páry, na kterých je nasazena technologie VDSL/VDSL2. Na základě změřených dat ze školního cvičení by student mohl uvést, do jaké vzdálenosti je vhodné nasazovat technologie VDSL2 (do jaké vzdálenosti jsou z hlediska studenta přenosové rychlosti uspokojující).

## **7.2 Teoretický úvod - VDSL2**

V teoretickém úvodu student napíše alespoň půl strany textu k dané problematice, tedy k VDSL2. Student je dotlačen k tomu, aby otevřel knihu či webové stránky a dohledal informace o dané aktivitě, sesumíroval si je a přehledně je vypsál. Mimo ověření svých znalostí z přednášek a doporučené literatury se student může dozvědět i něco nad rámec výuky, popř. si najít novou oblast zájmu.

## **7.3 Schéma zapojení**

Jelikož se jedná o protokol z měření, měl by být kdokoliv, kdo si tento protokol přečte, schopen toto měření zreplikovat, a proto je schéma zapojení nutnou součástí každého protokolu. Student je donucen zapřemýšlet nad danou problematikou a vymyslet schéma zapojení tak, aby byl schopen jak nastavit DSLAM, tak následně měřit. Dále bude muset toto schéma zanést do protokolu o měření.

## **7.4 Použité zařízení, místo měření**

Student by si při měření měl poznamenat všechna zařízení, se kterými pracoval a uvést je v seznamu použitých zařízení v protokolu. Dále by měl popsat pracoviště, datum měření, stav pracoviště, popř. vlhkost a teplotu. Všechny tyto ukazatele pomáhají při rekonstrukci měření k tomu, aby se dosáhlo co největší shody měření, popř. objevení rozdílnosti. Mimo to si myslím, že jsou tyto postupy běžnou součástí měření v praxi mimo školu, tudíž je to příprava do budoucna.

## 7.5 Postup měření

Student by měl zapsat přesně to, co musel vykonat, aby bylo možno měření provést. Opět to může někomu pomoci při opakování měření, popř. to může odhalit chyby měření.

## 7.6 Tabulky a grafy

Tabulky a z nich následně udělané grafy jsou výstupem měření dané úlohy. Měly by být dostatečně přehledné a velké. U grafů by měly být jednoznačně popsány osy a neměla by chybět legenda. Student by měl každý graf slovně popsat, popř. jej srovnat s jiným grafem, který najde na internetu či v knize.

## 7.7 Závěr a odpovědi na zadané otázky

V této části protokolu by měl student zhodnotit celé měření, naměřené hodnoty, grafy, popř. problémy, pokud nastaly. Student by měl své závěry doložit změřenými hodnotami. Po zhodnocení měření by měl student zodpovědět otázky, které mu budou položeny v zadání laboratorní práce.

## 7.8 Zdroje

Konec protokolu měření by měl obsahovat seznam použitých zdrojů informací, ze kterých student čerpal. Dle mého názoru by měly být alespoň dva a měly by být profesionálnějšího rázu, neměl by být použit portál Wikipedie apod.



## 8 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo popsat základní vlastnosti opticko metalických telekomunikačních sítí a jejich využití v praxi. Součástí práce měla být měření v laboratorním prostředí. Výstupem práce mělo být zhodnocení naměřených výsledků a návrh laboratorní úlohy pro výuku.

V teoretické části byly popsány základní vlastnosti optických a metalických přenosových médií, jejich stručná historie, typy, důvody používání, výhody a nevýhody a umístění v síti. Byly představeny základní přenosové systémy, které se dnes běžně používají. Důraz byl kladen na přístupové sítě, které využívají symetrické páry v doprovodu s technologií digitálních účastnických přípojek DSL.

V praktické části proběhlo měření jak na metalické, tak optické části sítě. V metalické části se měřily digitální účastnické přípojky ADSL2+ a VDSL2. Měření proběhlo ve školní laboratoři, kde byl použit simulátor vedení s krokem 100 metrů, co by náharada za reálné vedení. Důraz byl kladen na měření přenosové rychlosti a útlumu v závislosti na délce vedení. Z těchto dvou parametrů byly vytvořeny přehledné tabulky a grafy. Mimo samotné měření byla potřeba pracovat se školním DSLAMem, na kterém se nastavovaly základní přenosové specifikace. V optické části měření byly měřeny disperze a souhrnné údaje o trase pomocí reflektometru. Jako první bylo nutno vytvořit optické trasy k měření. Trasy 5, 10, 15 a 20 km byly vytvořeny propojením již vybudovaných optických tras školní laboratoře. Použité vlákno je jednovidové (G.652.A), tudíž odpadá měření vidové disperze. Po vytvoření tras bylo provedeno měření OTDR a měření chromatické a polarizační vidové disperze. Výsledky měření optických parametrů tras vyšly horší, než udává doporučení pro ono vlákno, což lze přisoudit optickým svarům, konektorům a míře využívání těchto tras v laboratorním prostředí.

Jako poslední část práce byl vyhotoven návrh laboratorního cvičení. V první části cvičení se student připojí na DSLAM, kde nastaví přenosovou rychlost portu, který bude následně měřit. V druhé části cvičení si student připojí do nastaveného portu analyzátor a ověří si, jak port funguje. V příloze k bakalářské práci je návrh laboratorní práce a vzorový protokol z měření podle tohoto návrhu.

## Literatura

- [1] SVOBODA, Jaroslav. *Telekomunikační technika: průřezová učebnice pro odborná učiliště a střední školy*. 2. vydání. Praha: Nakladatelství Sdělovací technika, 2000. ISBN 80-901936-3-3.
- [2] ŠIMÁK, Boris, Jiří, VODRÁŽKA, Jaroslav, SVOBODA. *Digitální účastnické přípojky xDSL*. Praha: Nakladatelství Sdělovací technika, 2005. ISBN 80-86645-07-X.
- [3] VODRÁŽKA, Jiří, Boris, ŠIMÁK. *Digitální účastnické přípojky xDSL*. Praha: Nakladatelství Sdělovací technika, 2008. ISBN 80-86645-16-9.
- [4] KDP. *Technické podmínky - Plastové sdělovací a ovládací kabely párové plněné s jádrem o průměru 1,0 mm* [online]. Dostupné z: <https://www.kabelovna.cz/download.php?idx=547>
- [5] KDP. *Technické podmínky - Kabely pro vnitřní instalace a propojení typu SYKY a SYKFY* [online]. Dostupné z: <https://www.kabelovna.cz/download.php?idx=552>
- [6] VODRÁŽKA, Jiří. *Přenosové systémy v přístupové síti*. 2. vydání, přeprac. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03386-4.
- [7] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: M. Filka, 2009. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [8] LAFATA, Pavel, Jiří, VODRÁŽKA. *Optické přístupové sítě a přípojky FTTx*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05463-5.
- [9] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-184-5.
- [10] ŠIŠKA, Petr. *Optoelektronika*. Skripta předmětu Optoelektronika, 2019.
- [11] JANSEN, Horst, Heinrich, RÖTTER. *Informační a telekomunikační technika*. Praha: Europa - Sobotáles, 2004. ISBN 80-86706-08-7.
- [12] PUŽMANOVÁ, Rita. *Širokopásmový Internet: přístupové a domácí sítě*. Brno: Computer Press, 2004. ISBN 80-251-0139-8.
- [13] BLUNÁR, Karol, Zdeněk, DIVIŠ. *Telekomunikační sítě*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1077-8.
- [14] The Fiber Optic Association, 2013. *Optical Time Domain Reflectometer (OTDR)* [online]. Dostupné z: <http://thefoa.org/tech/ref/testing/OTDR/OTDR.html>

- [15] Fiber Optic Components, 2015. *Evolution of Flat, PC, UPC and APC Fiber Connectors* [online]. Dostupné z: <http://www.fiber-optic-components.com/evolution-of-flat-pc-upc-and-apc-fiber-connectors.html>
- [16] Luna, 2013. *What is Return Loss and Why Measure It?* [online]. Dostupné z: <https://lunainc.com/return-loss-measure-it/>
- [17] The Fiber Optic Association, 2018. *Singlemode Fiber Types* [online]. Dostupné z: <http://www.thefoa.org/tech/smf.htm>
- [18] COLLINGS, Brandon, Fred HEISMAN, LIETAERT Gregory. *Reference Guide to Fiber Optic Testing: Volume 2* [online]. Dostupné z: <https://www.testronix.com.ph/downloads/fiber-fundamentals-guide-volume-2.pdf>
- [19] ITU-T, 2015. *G.993.2: Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2)* [online]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.2>
- [20] ITU-T, 2018. *G.993.5: Self-FEXT cancellation (vectoring) for use with VDSL2 transceivers* [online]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.5>
- [21] Kitz - Broadband Information Site. *ADSL Technology and DMT* [online]. Dostupné z: [https://kitz.co.uk/adsl/adsl\\_technology.htm](https://kitz.co.uk/adsl/adsl_technology.htm)
- [22] ITU-T, 2010. *L. 47: Access facilities using hybrid fibre/copper networks* [online]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.47-200010-I/en>
- [23] Wikipedia. *DOCSIS* [online]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/DOCSIS>
- [24] Stasanet. *Komprimační formáty a přenosová rychlost* [online]. Dostupné z: <https://www.stasanet.cz/Komprimacni-formaty-a-prenosova-rychlost/>
- [25] Dipolnet. *Optické standardy* [online]. Dostupné z: [https://www.dipolnet.cz/opticke\\_standardy\\_bib327.htm](https://www.dipolnet.cz/opticke_standardy_bib327.htm)
- [26] ITU-T, 2006. *G.993.1: Very high speed digital subscriber line transceivers (VDSL)* [online]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.1>
- [27] FILKA, Miloslav. *Optické sítě - přednášky* [online]. Brno, 2007. Dostupné z: [http://optolab.utko.feec.vutbr.cz/wp-content/uploads/Opticke\\_site\\_prednasky\\_P.pdf](http://optolab.utko.feec.vutbr.cz/wp-content/uploads/Opticke_site_prednasky_P.pdf)
- [28] VODRÁŽKA, Jaroslav. *Variety přípojek VDSL2* [online]. Praha, České vysoké učení technické v Praze, 2006. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/rservice.php?akce=tisk&cislocclanku=2006052401>

## A Seznam příloh a připojené soubory

<b>Příloha</b>	<b>Popis přílohy</b>
Příloha A	Seznam příloh a seznam připojených souborů na flash disku
Příloha B	Ukázka nastavení DSLAMu
Příloha C	Tabulky naměřených hodnot, jenž jsou pro stránky BP příliš velké
Příloha D	Šablona návrhu laboratorní úlohy
Příloha E	Vypracovaný protokol o měření z návrhu laboratorní úlohy

Na CD disku, jež je součástí bakalářské práce, jsou přílohy obsahující naměřená data, návrh laboratorní úlohy a vzorový protokol, jež byl vypracován podle návrhu laboratorní úlohy.

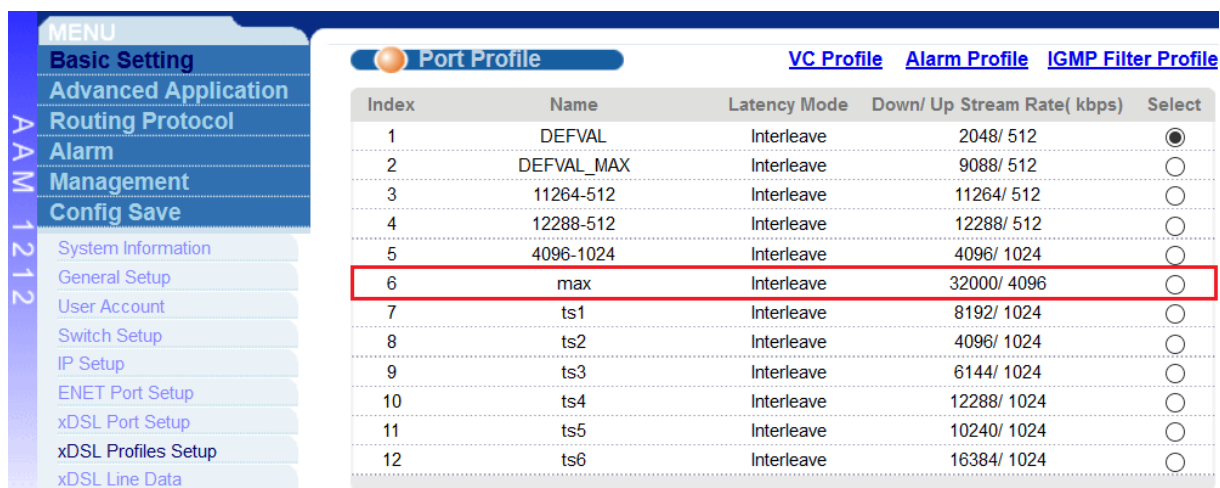
<b>Adresář</b>	<b>Popis adresáře</b>
ADSL2+	Data z měření přípojky ADSL2+
CD	Data z měření chromatické disperze
Návrh LÚ	Návrh laboratorní úlohy, naměřené hodnoty a vzorový protokol
OTDR	Data z měření reflektometrem
PMD	Data z měření polarizační vidové disperze
VDSL2	Data z měření přípojky VDSL2

## B Nastavení DSLAMu

Pro připojení je potřeba zjistit IP adresu DSLAMu. Dále je nutno propojit si stolní počítač s management portem DSLAMu, nebo být ve stejné síti s DSLAMem. Jako poslední se nastaví statická IP adresa stolnímu počítači tak, aby byl ve stejné podsíti s DSLAMem, a vloží se IP adresa DSLAMu do prohlížeče na stolním počítači. Pokud je vše nastaveno správně, objeví se vyskakovací okno s výzvou o zadání přihlašovacích údajů ke správě DSLAMu.

### Měření portu s neomezenou rychlostí přenosu

V DSLAMu byl pro potřeby měření maximální rychlosti zřízen profil max (obrázek 12).

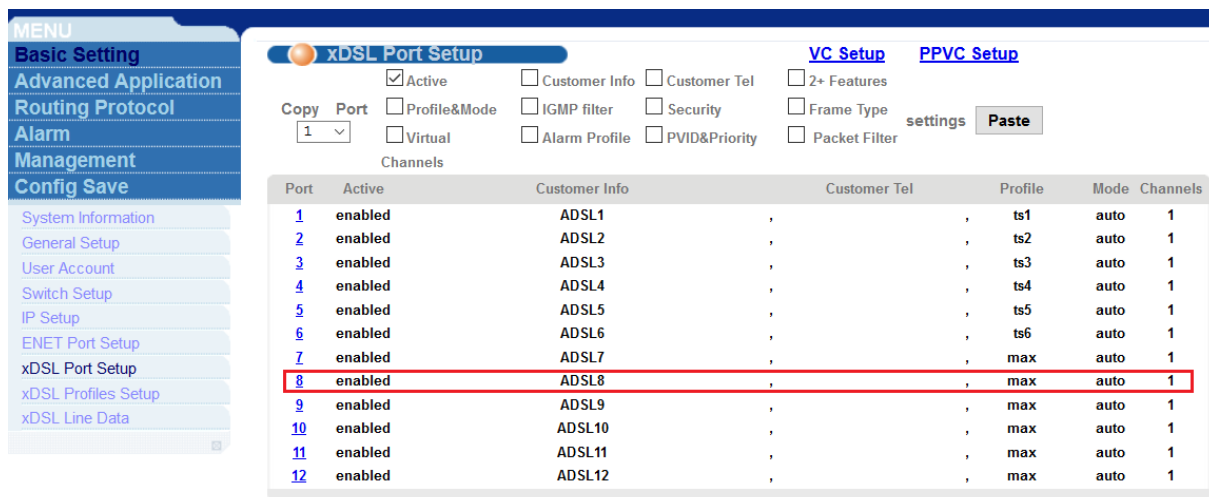


The screenshot shows the 'Port Profile' configuration page. On the left is a menu with options like 'Basic Setting', 'Advanced Application', 'Routing Protocol', 'Alarm', 'Management', and 'Config Save'. The main area displays a table of port profiles. The profile named 'max' with index 6 is highlighted with a red border.

Index	Name	Latency Mode	Down/ Up Stream Rate( kbps)	Select
1	DEFVAL	Interleave	2048/ 512	<input checked="" type="radio"/>
2	DEFVAL_MAX	Interleave	9088/ 512	<input type="radio"/>
3	11264-512	Interleave	11264/ 512	<input type="radio"/>
4	12288-512	Interleave	12288/ 512	<input type="radio"/>
5	4096-1024	Interleave	4096/ 1024	<input type="radio"/>
6	max	Interleave	32000/ 4096	<input type="radio"/>
7	ts1	Interleave	8192/ 1024	<input type="radio"/>
8	ts2	Interleave	4096/ 1024	<input type="radio"/>
9	ts3	Interleave	6144/ 1024	<input type="radio"/>
10	ts4	Interleave	12288/ 1024	<input type="radio"/>
11	ts5	Interleave	10240/ 1024	<input type="radio"/>
12	ts6	Interleave	16384/ 1024	<input type="radio"/>

Obrázek 12: Profil max v nastavení DSLAMu

Dále byl tento profil přiřazen měřenému portu č. 8 (obrázek 13).



The screenshot shows the 'xDSL Port Setup' configuration page. It includes checkboxes for 'Active', 'Customer Info', 'Customer Tel', '2+ Features', 'IGMP filter', 'Security', 'Frame Type', 'Virtual', 'Alarm Profile', 'PVID&Priority', and 'Packet Filter'. Below is a table listing ports and their configurations. The row for port 8 is highlighted with a red border.

Port	Active	Customer Info	Customer Tel	Profile	Mode	Channels
1	enabled	ADSL1	,	ts1	auto	1
2	enabled	ADSL2	,	ts2	auto	1
3	enabled	ADSL3	,	ts3	auto	1
4	enabled	ADSL4	,	ts4	auto	1
5	enabled	ADSL5	,	ts5	auto	1
6	enabled	ADSL6	,	ts6	auto	1
7	enabled	ADSL7	,	max	auto	1
8	enabled	ADSL8	,	max	auto	1
9	enabled	ADSL9	,	max	auto	1
10	enabled	ADSL10	,	max	auto	1
11	enabled	ADSL11	,	max	auto	1
12	enabled	ADSL12	,	max	auto	1

Obrázek 13: Přiřazení profilu max pro měřený port č.8

## Měření portu s omezenou rychlostí přenosu

V DSLAMu byl pro potřeby měření omezené rychlosti zřízen profil BP\_GRU0068 (obrázek 14).

Name	BP_GRU0068	
Latency Mode	Interleave	
	Up Stream	Down Stream
Max Rate	1024 (64-4096)kbps	16384 (64-32000)kbps
Min Rate	512 (32-4096)kbps	4096 (32-32000)kbps
Interleave Delay	20 (1-255) ms	20 (1-255) ms
Max SNR	31 (0-31) dB	31 (0-31) dB
Min SNR	0 (0-31) dB	0 (0-31) dB
Target SNR	6 (0-31) dB	6 (0-31) dB
Up Shift SNR	9 (0-31) dB	9 (0-31) dB
Down Shift SNR	3 (0-31) dB	3 (0-31) dB
<div>Add Cancel</div>		

Obrázek 14: Profil s omezenou rychlostí přenosu v nastavení DSLAMu

Dále byl tento profil přiřazen měřenému portu č. 8 (obrázek 15).

MENU

Basic Setting

Advanced Application

Routing Protocol

Alarm

Management

Config Save

System Information

General Setup

User Account

Switch Setup

IP Setup

ENET Port Setup

xDSL Port Setup

xDSL Profiles Setup

xDSL Line Data

xDSL Port Setup

☒ Active ☐ Customer Info ☐ Customer Tel ☐ 2+ Features

Copy Port ☐ Profile&Mode ☐ IGMP filter ☐ Security ☐ Frame Type

1 ☐ Virtual ☐ Alarm Profile ☐ PVID&Priority ☐ Packet Filter

Channels settings Paste

Port	Active	Customer Info	Customer Tel	Profile	Mode	Channels
1	enabled	ADSL1	,	ts1	auto	1
2	enabled	ADSL2	,	ts2	auto	1
3	enabled	ADSL3	,	ts3	auto	1
4	enabled	ADSL4	,	ts4	auto	1
5	enabled	ADSL5	,	ts5	auto	1
6	enabled	ADSL6	,	ts6	auto	1
7	enabled	ADSL7	,	max	auto	1
8	enabled	ADSL8	,	BP_GRU0068	auto	1
9	enabled	ADSL9	,	max	auto	1
10	enabled	ADSL10	,	max	auto	1
11	enabled	ADSL11	,	max	auto	1
12	enabled	ADSL12	,	max	auto	1

Obrázek 15: Přiřazení profilu BP\_GRU0068 pro měřený port č.8

## VDSL2

**Nastavení portů na DSLAMu** Pro nastavení vlastností jednotlivých portů DSLAMu se používají šablony (VDSL Template). Ta se skládá ze tří částí (profilů):

- Line Profile - Nastavení frekvenčního plánu, vysílací výkony, SNR Margin, PSD Mask apod.
- Channel Profile - Nastavení maximální a minimální přenosové rychlosti pro oba směry přenosu

- Inm Profile - Monitorování šumových charakteristik

Inm profil je ponechána v defaultním nastavení. U Channel profilu je pouze změněna maximální možná přenosová rychlost pro oba směry přenosu, a to na 110 Mbit/s (obrázek 16. Větší hodnotu nastavit nelze.

VDSL Channel Profile Setup				Template	LineProfile	InmProfile
Name	max					
DownStream						
Net Data Rate	MAX	110000	MIN	192		
Max Interleave Delay	7	ms				
Min INP	2	symbol				
Min INP8	2	symbol				
PhyR	<input checked="" type="radio"/> Enable <input type="radio"/> Disable <input type="radio"/> Auto					
SOS Min Data Rate	20000					
G.INP	DS:Forbidden US:Forbidden			<a href="#">Modify</a>		


Obrázek 16: Channel profil s nastavenou maximální rychlostí 110 Mbit/s

Line profily se nastavily dva - jeden profil pro frekvenční plán 17a a jeden pro plán 30a.

VDSL Line Profile Setup				Template	ChanProfile	InmProfile
Name	BP_GRU0068					
VDSL2 Profile	<input checked="" type="checkbox"/> 30a <input type="checkbox"/> 17a <input type="checkbox"/> 12a <input type="checkbox"/> 12b <input type="checkbox"/> 8a <input type="checkbox"/> 8b <input type="checkbox"/> 8c <input type="checkbox"/> 8d					
DownStream						
Max SNR Margin	31.0	dB	<input type="checkbox"/> noLimit			
Target SNR Margin	6.0	dB				
Min SNR Margin	0.0	dB				
Bitswap	<input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off					
Max Rx Power						
Max Tx Power	14.5	dBm	14.5 dBm <input type="checkbox"/> noLimit			
Min Overhead Rate	16	kbps	16 kbps			
UpStream						
Max SNR Margin	31.0	dB	<input type="checkbox"/> noLimit			
Target SNR Margin	6.0	dB				
Min SNR Margin	0.0	dB				
Bitswap	<input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off					
Max Rx Power						
Max Tx Power	14.5	dBm	14.5 dBm <input type="checkbox"/> noLimit			
Min Overhead Rate	16	kbps	16 kbps			
Limit PSD Mask						
Transmission Mode		G.993.2 Annex A				
ADSL/VDSL Protocol		<a href="#">Modify</a>				
Class Mask		998				
Limit Mask		D-32				
US0 Mask		EU-32				
Compatible Mode		None				

Obrázek 17: Line profil frekvenčního plánu 30a

Ze 30a profilu se vytvoří šablona GRU0068\_profil30a.



**VDSL Template Setup**
LineProfile
ChanProfile
InmProfile

Name	GRU0068_profil30a			
Line Profile	BP_GRU0068 ▾			
Channel Profile	DEFVAL ▾			
Inm Profile	DEFVAL ▾			
Rate Adaptation Ratio	DownStream		UpStream	
Channel1	100	%	100	%

Add
Cancel
Clear

Obrázek 18: Vytvoření šablony GRU0068\_30a

A nakonec se šablona přiřadí k měřenému portu DSLAMU.

 <b>VDSL Line Setup</b>			
Port	Primary Template	Fallback Template	Alarm Template
1	GRU0068_profil30a ▾	DEFVAL ▾	DEFVAL ▾
2	GRU0068_profil17a ▾	DEFVAL ▾	DEFVAL ▾
3	DEFVAL ▾	None ▾	DEFVAL ▾
4	DEFVAL ▾	None ▾	DEFVAL ▾

Obrázek 19: Přiřazení šablony k portu



## C Tabulky hodnot z měření

Zde jsou k vidění tabulky naměřených hodnot, které byly pro vložení do práce příliš velké.

Trasa a číslo měření [km_měření]	PMD [ps]	PMD Coefficient [ps/ $\sqrt{km}$ ]
5_1	1,5837	0,7069
5_2	1,5823	0,7062
5_3	1,5901	0,7097
5_4	1,5815	0,7059
5_5	1,5817	0,7060
10_1	1,4670	0,4686
10_2	1,4625	0,4672
10_3	1,4628	0,4673
10_4	1,4576	0,4656
10_5	1,4562	0,4562
15_1	1,8083	0,4701
15_2	1,8120	0,4710
15_3	1,8093	0,4703
15_4	1,8030	0,4687
15_5	1,7995	0,4678
20_1	2,2475	0,5025
20_2	2,2478	0,5026
20_3	2,2476	0,5026
20_4	2,2383	0,5005
20_5	2,2214	0,4967

Tabulka 11: Polarizační vidová disperze před zprůměrováním

Vzdálenost [m]	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Přenos. rychlost [kb/s]	Útlum [dB]	Přenos. rychlost [kb/s]	Útlum [dB]
0	25783	0,00	1375	0,0
100	25707	1,6	1371	0,0
200	25791	3,8	1379	0,6
300	25964	5,7	1375	1,9
400	25775	8,4	1375	3,3
500	25915	10,4	1371	4,6
600	25887	13,1	1369	5,3
700	25819	15,3	1361	6,5
800	25463	17,1	1369	7,9
900	25515	18,7	1375	9,3
1000	25180	20,5	1379	10,7
1100	23764	22,2	1375	11,6
1200	21126	24,6	1359	12,7
1300	22838	26,7	1343	13,9
1400	23181	28,4	1303	15,3
1500	22595	30,1	1299	15,9
1600	22076	31,3	1296	17,4
1700	21031	33,3	1292	18,7
1800	20255	34,9	1269	20,0
1900	17593	37,2	1249	20,8
2000	16830	38,3	1253	22,1
2100	15940	40,3	1229	23,5
2200	14719	41,8	1229	24,7
2300	13743	43,2	1145	25,4
2400	12703	45,2	1157	26,8
2500	11692	46,8	1160	28,0
2600	10899	48,3	1115	29,4
2700	8186	49,7	1047	31,0
2800	7864	51,3	1036	32,3
2900	7203	52,8	1017	33,6
3000	6841	54,7	974	34,9
3100	6396	55,9	939	35,6
3200	5988	57,8	902	36,9
3300	5497	59,3	844	38,2
3400	5025	60,9	851	39,5
3500	3447	61,5	777	40,3
3600	3458	63,0	751	41,7
3700	3403	64,7	716	43
3800	3054	66,1	673	44,3
3900	3051	67,0	628	45
4000	2741	68,5	596	46,3

Tabulka 12: Tabulka naměřených hodnot ADSL2+ přípojky při neomezené rychlosti

Vzdálenost [m]	Sestupný směr		Vzestupný směr	
	Přenos. rychlost [kb/s]	Útlum [dB]	Přenos. rychlost [kb/s]	Útlum [dB]
0	16383	0,00	1021	0,0
100	16383	1,6	1021	0,0
200	16383	3,8	1021	0,6
300	16383	5,7	1021	1,9
400	16383	8,4	1021	3,3
500	16383	10,5	1021	4,7
600	16383	12,9	1021	6,0
700	16383	15,3	1021	6,5
800	16383	17,1	1021	7,9
900	16383	18,7	1021	9,3
1000	16383	20,5	1021	10,6
1100	16383	22,8	1021	11,3
1200	16383	24,6	1021	12,7
1300	16383	26,7	1021	13,9
1400	16383	28,4	1021	15,3
1500	16383	30,2	1021	15,9
1600	16383	31,3	1021	17,2
1700	16383	32,9	1021	18,7
1800	16383	34,9	1021	20,0
1900	16383	37,2	1021	20,8
2000	16383	38,3	1021	22,1
2100	15893	40,3	1021	23,5
2200	14763	41,6	1021	24,7
2300	13732	43,3	1021	25,4
2400	12679	44,8	1021	26,8
2500	11688	46,8	1021	28,0
2600	10891	48,3	1021	29,4
2700	8206	49,7	1021	31,0
2800	7907	51,3	1021	32,3
2900	7152	52,8	1021	33,6
3000	6810	54,7	989	34,9
3100	6412	56,0	936	35,6
3200	5957	57,8	936	36,9
3300	5469	59,3	875	38,2
3400	5025	60,9	847	39,5

Tabulka 13: Tabulka naměřených hodnot ADSL2+ přípojky při omezené rychlosti

## D Šablona zadání laboratorní úlohy

Název předmětu	
Protokol č.:	Datum:
Název:	<b>Nastavení přenosové rychlosti a ověření funkčnosti</b>
Vypracoval: login:	Spolupracoval: login:

### 1. Zadání laboratorní úlohy

Připojte se na VDSL DSLAM a nastavte profil VDSL2 30a a limit pro přenosovou rychlost pro oba směry přenosu. Limity volte v rozmezí 60–100 Mbit/s pro směr sestupný (Downstream) a 20-100 Mbit/s pro směr vzestupný (Upstream). Po příslušném nastavení vhodně propojte analyzátor na svém pracovišti se simulátorem vedení a DSLAMem. Proveďte měření s krokem 100 m, které nastavíte pomocí simulátoru vedení. Z naměřených hodnot vytvořte grafy závislosti přenosové rychlosti a útlumu na vzdálenosti.

V závěru protokolu zodpovězte tyto otázky:

- Jaký má důsledek zvětšení frekvenčního pásma technologie VDSL, resp. VDSL2, oproti technologii ADSL?
- Jakou modulaci používá technologie VDSL2? Stručně ji popište.
- Vysvětlíte pojem FTTx a určete jeho vztah k technologii VDSL, resp. VDSL2.

### 2. Teoretický úvod – VDSL2

Zde napište alespoň půl strany textu k technologii VDSL2.

### 3. Schéma zapojení

Zde vložte schéma zapojení, které bylo použito při měření.

### 4. Použité zařízení, místo měření

Zde přehledně sepište použité zařízení a stručně popište pracovní místo.

### 5. Postup měření

Zde sepište přesný postup měření.

### 6. Tabulky a grafy

Zde vytvořte přehledné tabulky a grafy. Grafy stručně okomentujte.

### **7. Závěr**

Zde sepište závěr protokolu (zhodnocení) a odpovězte na otázky ze zadání.

### **8. Zdroje**

Zde uveďte použité zdroje.

## E Vzorový protokol z měření laboratorní úlohy

VŠB TECHNICKÁ  
UNIVERZITA  
OSTRAVA

FAKULTA  
ELEKTROTECHNIKY  
A INFORMATIKY

KATEDRA  
TELEKOMUNIKAČNÍ  
TECHNIKY

Název předmětu	
Protokol č.: 1	Datum: 17. 4. 2019
Název:	Nastavení přenosové rychlosti a ověření funkčnosti
Vypracoval: Lukáš Grunert login: GRU0068	Spolupracoval: login:

### 1. Zadání laboratorní úlohy

Připojte se na VDSL DSLAM a nastavte profil VDSL2 30a a limit pro přenosovou rychlost pro oba směry přenosu. Limity volte v rozmezí 60–100 Mbit/s pro směr sestupný (Downstream) a 20–100 Mbit/s pro směr vzestupný (Upstream). Po příslušném nastavení vhodně propojte analyzátor na svém pracovišti se simulátorem vedení a DSLAMem. Proveďte měření s krokem 100 m, které nastavíte pomocí simulátoru vedení. Z naměřených hodnot vytvořte grafy závislosti přenosové rychlosti a útlumu na vzdálenosti.

V závěru protokolu zodpovězte tyto otázky:

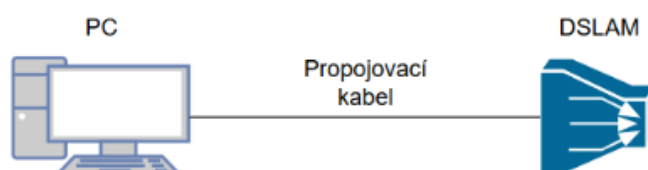
- Jaký má důsledek zvětšení frekvenčního pásma technologie VDSL, resp. VDSL2, oproti technologii ADSL?
- Jakou modulaci používá technologie VDSL2? Stručně ji popište.
- Vysvětlíte pojem FTTx a určete jeho vztah k technologii VDSL, resp. VDSL2.

### 2. Teoretický úvod – VDSL2

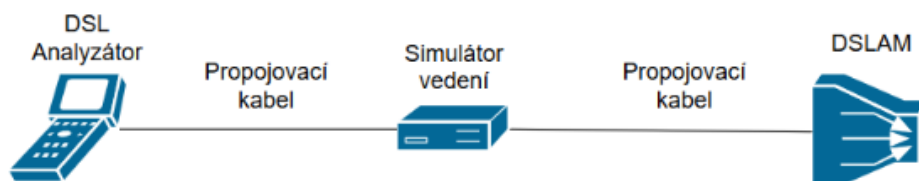
VDSL2 je komunikační technologie, která se nasazuje na kabelech se symetrickými páry, které kdysi sloužily pro nízkofrekvenční (do 4 kHz) analogový přenos hlasu (v rámci veřejné telefonní sítě POTS – Plain Old Telephone Service). Tato technologie pracuje na 2. vrstvě ISO/OSI modelu (Linková vrstva). Technologie podporuje symetrický i asymetrický datový přenos. Maximální teoretická přenosová rychlost se pohybuje okolo 200 Mbit/s na velmi krátké vzdálenosti (stovky metrů). Tato přenosová rychlost je ovlivňována kvalitou kabelu, počtem účastnických linek v kabelu, okolním rušením, délkou vedení. VDSL2 využívá multitónovou modulaci DMT (Discrete MultiTone). Modulace DMT je ve VDSL2 30a verzi rozdělena na 3479 subpásem (tónů) o frekvenční šířce 8,625 kHz. VDSL2 používá SRA (Seamless Rate Adaption), díky čemuž adaptivně mění přenosovou rychlost za provozu dle měření rušení z okolních párů. Dále je schopno redukovat vysílací výkon tak, aby zbytečně nepřecházel výkon do okolních párů.[1]

### 3. Schéma zapojení

Jako první bylo propojeno PC s DSLAMem, aby mohl být nastaven dle zadání:



Po nastavení DSLAMu byl k DSLAMu připojen simulátor vedení a analyzátor dle následného schéma:



### 4. Použité zařízení, místo měření

DSL analyzátor: VeEX VePAL BX100V

Simulátor vedení: Spirent DLS 6900

DSLAM: ZyXEL VES1724-56

Propojovací kabely: UTP Cat5e

### 5. Postup měření

Připojení PC k management portu DSLAMU (nebo do stejné podsítě) a připojení se na jeho IP adresu, zadání potřebných přihlašovacích údajů.

Nastavení profilu 30a (30 MHz VDSL2) a přenosové rychlosti (volena rychlost 80 Mbit/s pro sestupný a 20 Mbit/s pro vzestupný směr přenosu).

Přiřazení nastavení k portu, který byl měřen.

Propojení pracovního místa se simulátorem vedení.

U simulátoru vedení přepnutí na standard PE04.

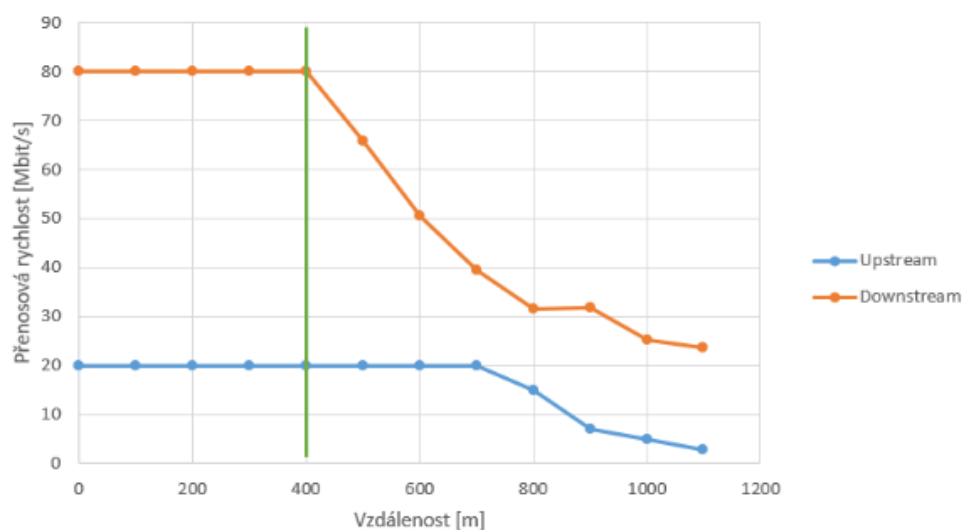
Propojení simulátoru vedení s DSLAMem (na měřený port).

Měření s krokem 100 metrů, ukládání výsledků v analyzátoru.

## 6. Tabulky a grafy

Vzdálenost [m]	Směr vzestupný (Upstream)		Směr sestupný (Downstream)	
	Přen. Rychlost [Mbit/s]	Útlum [dB]	Přen. Rychlost [Mbit/s]	Útlum [dB]
0	20	0,7	80	1,4
100	20	10,1	80	7,5
200	20	18,1	80	11,7
300	20	24,6	80	14,4
400	20	30,1	80	17,3
500	20	36,5	65,7	19,6
600	20	42	50,5	21,6
700	20	48	39,4	23,7
800	14,9	53,4	31,6	25,6
900	7	64,1	31,7	29,1
1000	4,8	69,9	25,1	31
1100	2,9	75,3	23,6	32,6

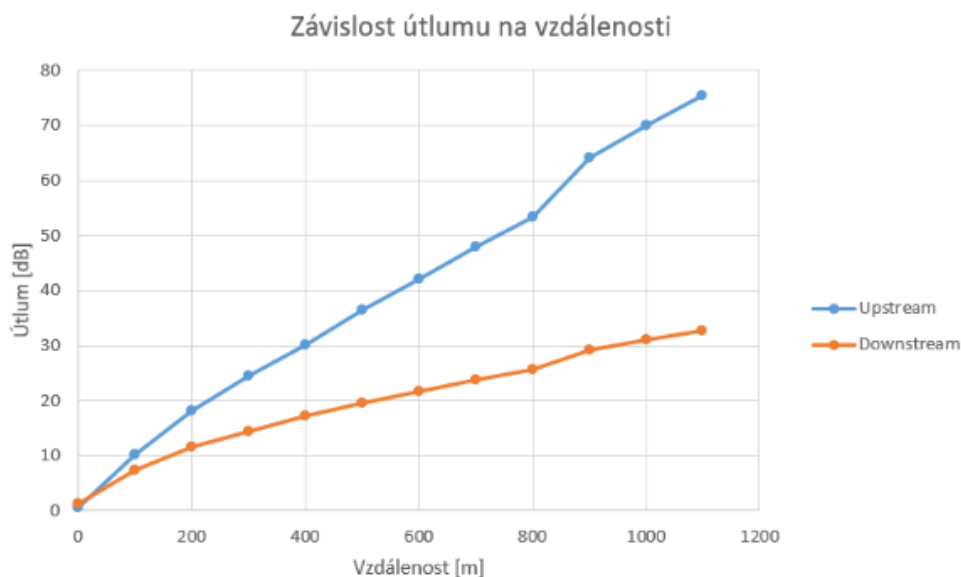
Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti



Z grafu plyne, že do vzdálenosti 400 metrů (označeno zelenou kolmicí) je systém schopen poskytovat takovou rychlost, jaká byla nastavena. S rostoucí vzdáleností dále rychlost upadá. Nutno podotknout, že při vzdálenosti 1000



metrů si systém zachovává přenosovou rychlost, která je maximální pro přípojku ADSL2+ (25,1 Mbit/s pro směr sestupný a 4,8 Mbit/s pro směr vzestupný).



Graf útlumu ukazuje to, jak s narůstající vzdáleností roste útlum obou směrů přenosu. Směr vzestupný (Upstream) je tlumen více z toho důvodu, že je druhé upstream pásmo (U2) frekvenčně nejvýše (U2 pásmo je pro VDSL2 30a profil používáno na frekvenci 18 až 30 MHz).[I]

## 7. Závěr

Měření proběhlo v pořádku, změřené výsledky souhlasí s teorií. Pro vybranou rychlost 80/20 Mbit/s se zjistilo, že by mohla být poskytována do vzdálenosti zhruba 400 metrů. Při vzdálenosti 1000 metrů měla VDSL2 30a přípojka přenosovou rychlost prakticky stejnou, jako je maximální přenosová rychlost přípojky ADSL2+.

Odpověď na první otázku položenou v zadání je možno najít v naměřených grafech, tedy zvýšení přenosové rychlosti a snížení dosahu přípojky.

Přípojka VDSL2 má od roku 2006 standardizovanou pouze modulaci DMT. Modulace DMT je modulací s více nosnými, která rozděluje celé používané frekvenční pásmo do konstantně velkých subpásem (tónů). V těchto

subpásmech je dále uskutečňována modulace QAM (Quadrature Amplitude Modulation – Kvadrurní amplitudová modulace).[I]

Pojem FTTx znamená Fiber To The x, tedy zavedení vlákna do určitého místa. Tento pojem se spojení s přístupovou částí sítě, kde se do míst, kde je síť metalická, zavádí optické vlákno. FTTx se používá ve spojení s přípojkou VDSL2 v ten moment, pokud je účastník do 300 metrů od DSLAMu. Jelikož jsou účastníci v praxi často dále než pouhých 300 metrů, instalují se do hustě obydlených míst a míst s vysokou peněžitou návratností tzv. rDSLAMy, což jsou předsunuté DSLAMy, které mají vzdálenost mezi účastníkem a ústřednou zkrátit. Pokud je ústředna s rDSLAMem umístěna někde k chodníku či na ulici, říkáme tomu řešení FTTCab (Fiber To The Cabinet).[II]

## 8. Zdroje

- I. ITU-T. *G.993.2: Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2)* [online]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.2-201805-S!Amd4/en>
- II. LAFATA, Pavel, Jiří, VODRAŽKA. *Optické přístupové sítě a přípojky FTTx*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05463-5.